OFPPT

ROYAUME DU MAROC

مكتب التكوين المهني وإنعاش الشغل

Office de la Formation Professionnelle et de la Promotion du Travail

DIRECTION RECHERCHE ET INGENIERIE DE FORMATION

VERSION EXPERIMENTALE

RESUME THEORIQUE

&

GUIDE DE TRAVAUX PRATIQUES

MODULE 05	CONNAISSANCE DES ESSAIS DES MATERIAUX

SECTEUR : BTP

SPECIALITE : CHEF DE CHANTIER TRAVAUX PUBLICS

NIVEAU : TECHNICIEN

(APC) Juin.2007

REMERCIEMENTS

La DRIF remercie les personnes qui ont contribué à l'élaboration du présent document.

Pour la supervision :

M. Khalid BAROUTI	Chef projet BTP
Mme Najat IGGOUT	Directeur du CDC BTP
M. Abdelaziz EL ADAOUI	Chef de Pôle CDC /BTP

Pour la conception :

Mr JIGOREANU DORU	Formateur animateur au CDC /BTP

Pour la validation :

Mme GUNINA Fatna	Formatrice animatrice au CDC /BTP
Mr TABTI Mohamed	Formateur animateur au CDC /BTP

Les utilisateurs de ce document sont invités à communiquer à la DRIF toutes les remarques et suggestions afin de les prendre en considération pour l'enrichissement et l'amélioration de ce programme.

DRIF

SOMMAIRE :

MODULE 5 : CONNAISSANCE DES ESSAIS DES MATERIAUX

Durée : 72 heures

OBJECTIF OPERATIONNEL DE PREMIER NIVEAU DE COMPORTEMENT

- **COMPORTEMENT ATTENDU**

Pour démontrer sa compétence, le stagiaire doit réaliser des essais en laboratoire, sur les matériaux, selon les conditions, les critères et la précision qui suivent.

- **CONDITIONS D'EVALUATION**

A partir :

- Des connaissances accumulées,
- Des règles qu'il doit suivi,
- Utilisation correcte de l'équipement d'un laboratoire;

A l'aide :

- Des essais à élaborer,
- Exploitation juste des résultats,
- D'une documentation pertinente :lois, règlements, etc.

- **CRITERES GENERAUX DE PERFORMANCE**

- Respect des règles d'élaboration des essais,
- Exploitation juste des résultats obtenus,
- Mode d'emploi correcte du matériel;

OBJECTIF OPERATIONNEL DE PREMIER NIVEAU
DE COMPORTEMENT

PRECISION SUR LE COMPORTEMENT ATTENDU	CRITERES PARTICULIERS DE PERFORMANCE
A. Connaître les essais pour le béton frais.	▪ Essais pour ciment; ▪ Essais pour granulats; ▪ Essais pour l'eau de gâchage; ▪ Essais pour adjuvants; ▪ Essais de maniabilité; ▪ Détermination du temps de vibration;
B. Connaître les essais pour le béton durcis.	▪ Essai de compression centrique; ▪ Essai de traction directe; ▪ Essai de traction par fendage; ▪ Essai de traction par flexion; ▪ Porosité et absorption; ▪ Essais non destructifs;
C. Connaître les essais des sols in situ.	▪ La méthode de la table ou vérine; ▪ Pénétromètre statique; ▪ Pénétromètre dynamique; ▪ Méthodes de forage;
D. Connaître les essais des sols in laboratoire.	▪ masse volumique apparente; ▪ limite d'Atterberg; ▪ essai Proctor; ▪ essai Californian Bearing Ratio; ▪ essai de Casagrande; ▪ essai de sédimentation; etc.

OBJECTIFS OPERATIONNELS DE SECOND NIVEAU

LE SRAGIAIRE DOIT AVOIR LES SAVOIR, SAVOIR – FAIRE OU SAVOIR – ËTRE NECESSAIRES POUR L'ATTEINTE DE L'OBJECTIF DE PREMIER NIVEAU, TELS QUE :

A) Avant d'apprendre à connaître les essais pour le béton frais, le stagiaire doit :

a) Connaître les composants d'un mélange du béton ,
b) Connaître les essais nécessaires pour chaque composant,
c) Connaître les phases quand ces essais sont nécessaires;

B) Avant d'apprendre à connaître les essais pour le béton durcis, le stagiaire doit :

a) Connaître la méthode de prélèvement des prouves ,
b) Connaître les méthodes de conservation des prouves jusqu'à l'essai,
c) Connaître les délais nécessaires pour effectuer ces essais;

C) Avant d'apprendre les essais des sols in situ, le stagiaire doit :

a) Connaître les différents types des sols,
b) Connaître les méthodes pour identifier un type de sol,
c) Connaître le mode de distribution des efforts en sols;

D) Avant d'apprendre les essais des sols en laboratoire, le stagiaire doit :

a) Connaître les méthodes d'échantillonnage des matériaux pour essais,
b) Connaître les abaques de donnés pour déterminer les résultats des essais,
c) Connaître l'importance de ces essais pour la stabilité et la sûreté des bâtiments;

PRESENTATION DU MODULE

Le module : **« Connaissance des essais des matériaux »** , s'apprend pendant le première semestre de formation, donc dans le premier année de formation.

Cet module est conçu autour du processus de la construction de bâtiment. Les thèmes développé recouvrent à la fois des étapes de l'acte de construire (études, exécution…) et des thèmes transversaux (contrôle/auto – contrôle, relation client – fournisseur).

L'importance des grandes étapes de déroulement des activités d'apprentissage des « Connaissance des essais des matériaux » , est de connaître le but et les objectifs suivants :

- Pouvoir définir les principaux essais des matériaux ;
- Connaître les modes opératoires des essais ;
- Comprendre l'importance des essais des matériaux ;
- Maîtriser les règles d'exploitation des résultats ;
- Gérer et organiser les essais nécessaires pour un chantier ;

Durée : 72 heures

- Théorie = 18 heures
- Pratique = 48 heures
- Epreuve = 6 heures

MODULE N° 05 :

CONNAISSANCE DES ESSAIS DES MATERIAUX

RESUME DE THEORIE

I. 1. Les caractéristiques des granulats

I. 1. a. Caractéristiques physiques

I. 1. a. 1. Dimensions nominales

Définition : les granulats sont des graines de sol avec les dimensions entre 0,08 mm et 80 mm. Au-dessous de 0,08 mm on trouve les fillers, farines ou fines ; et au-dessus de 80 mm on trouve les moellons ou les galets.

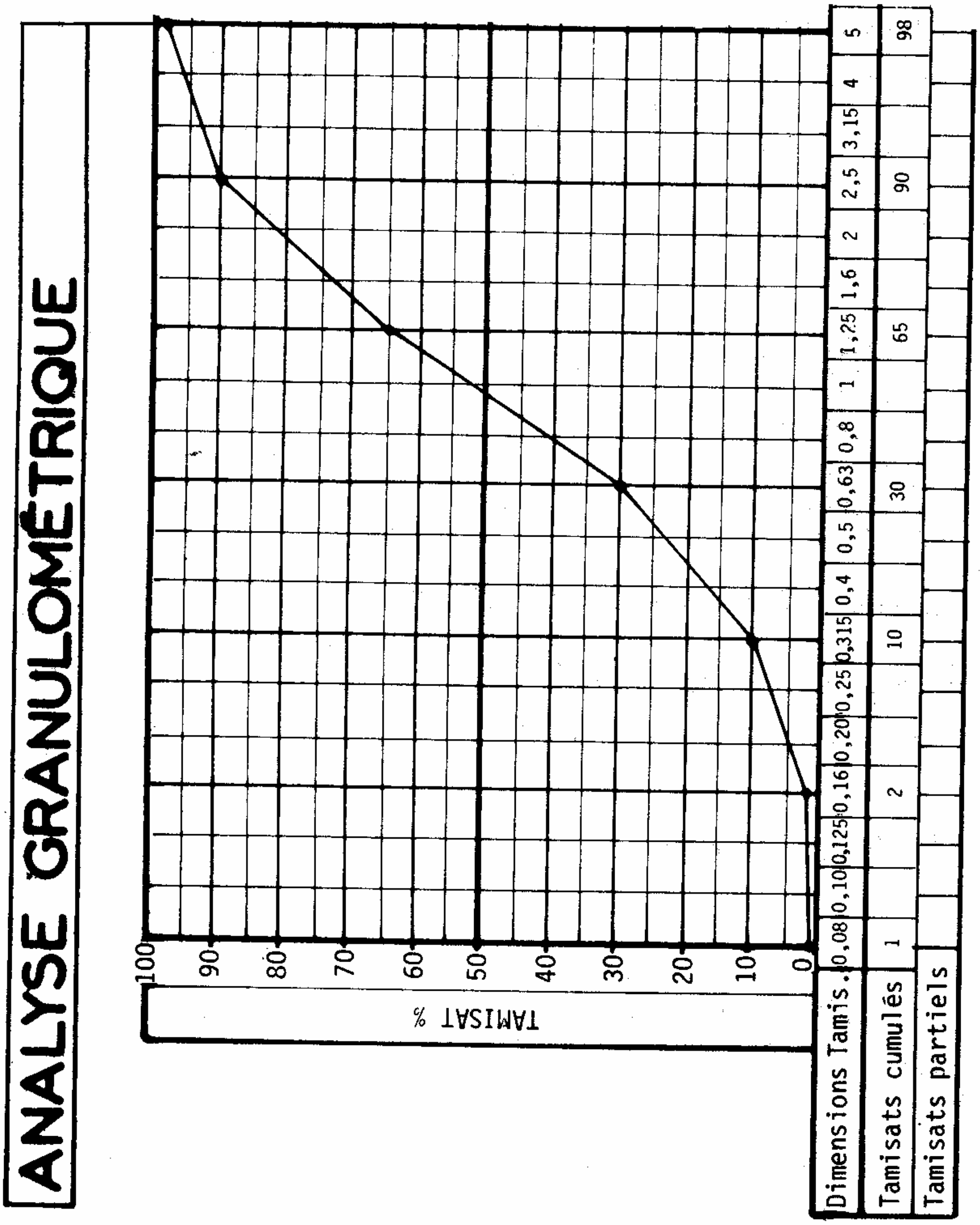
- **Les dimensions nominales –** représente la longueur du côté formé par les trous des tamis. Ces dimensions nominales (**d ou D, en mm)** sont normalisées comme ensuite :
  0,080 0,100 0,125 0,160 0,200 0,250 0,315 0,400 0,500 0,630
  0,800 1,000 1,250 1,600 2,000 2,500 3,150 4,000 5,000 6,300
  8,000 10,00 12,50 16,00 20,00 25,00 31,50 40,00 50,00 63,00
  80,00
- La terminologie usuelle des granulats, selon leurs dimensions nominales est indiquée dans la norme : NFP 18.101 ; et on trouves les catégories suivantes :
  - Classes granulaire – un granulat est caractérisé du point de vue granulaire, par sa classe d/D ; cela signifiant que (d) désigne la plus petite dimension et (D) la plus grande dimension des grains (par exemple : 20/40 mm) ;
  - Granulat élémentaire **–** est un granulat entièrement retenu sur le tamis D(i) ; et passant entièrement à travers le tamis D(i+1) ; où D(i) et D(i+1) sont dimensions nominales consécutives ;
  - Granulat composé – est un mélange de deux ou plusieurs granulats élémentaires différents, tous les granulats commerciaux entrent dans la classe des granulats composés ;

II. 1. a. 2. Granulométrie

Définition : la granulométrie permet de déterminer l'échelonnement des dimensions des grains contenus dans un granulat.

- L'analyse de granulométrie consiste à tamiser le granulat sur une série de tamis à maille carrée, de dimensions d'ouverture décroissantes et à peser le refus sur chaque tamis. Les ouvertures carrées des tamis sont normalisées de 0,08 à 80 mm.
- Selon les dimensions de granulat, on a les sables (de 0,08 à 5 mm.) gravillons (de 5 à 20 mm.) et cailloux (de 20 à 80 mm.) A leur tours, chacune de ces catégories se divise en trois classes d'éléments : fins, moyens et gros.

- Si on prend sur ordonné les dimensions de mailles des tamis et sur abscisse le pourcentage de granulat qui reste sur chaque tamis, on peut tracer une courbe qui s'appelle la courbe granulométrique d'un mélange de granulats.
- La forme idéale d'une courbe granulométrique est représentée sur le schéma ci-dessous :



APPELATION		MAILLE DES TAMIS
Fillers, farines ou fines		< 0,08 mm
Sables	- Fins - Moyens - Gros	0,08 à 0,31 0,31 à 1,25 1,25 à 5,00
Gravillons	- Fins - Moyens - Gros	5,00 à 8,00 8,00 à 12,50 12,50 à 20,00
Cailloux	- Fins - Moyens - Gros	20,00 à 31,50 31,50 à 50,00 50,00 à 80,00
Moellons et galets		> 80 mm

- La courbe granulométrique exprime les pourcentages cumulés, en poids, de grains passant des tamis successifs.
- Par exemple un sable 0/5 peut se composer de 95% de grains de 2,50 à 5,00 mm et de 5% de grains de 0 à 2,50 mm ; il est donc indispensable de fixer la proportion de grains fins, moyens, et gros.
- La forme de la courbe granulométrique renseigne immédiatement sur la granularité du granulat, comme en suite :
  - courbe en forme de doucine – granulat courant (bon) ;
  - courbe convexe vers le haut – granulat riche en éléments fins ;
  - courbe concave vers le bas – granulat pauvre en éléments fins ;
  - courbe présentant un palier – il manque les éléments moyens ;

III. 1. a. 3. Module de finesse

Définition : le module de finesse d'un granulat est égale au 1/100 ème de la somme des refus, exprimés en pourcentages de poids sur les différents tamis de la série suivante : 0,08 ; 0,016 ; 0,315 ; 0,63 ; 1,25 ; 5,0 ; 10,0 ; 20,0 ; 40,0 ; 80,0 ;

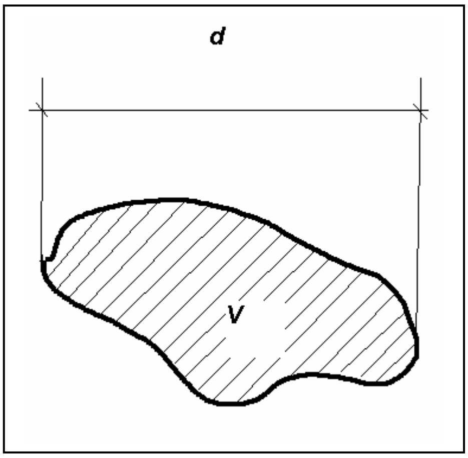
- On peut constater que le module de finesse sera d'autant plus petit que le granulat sera plus riche en éléments fins. Les essais ont montré que les sables ayant un module de finesse voisin de 2,5 ; donne les meilleurs résultats pour la fabrication du béton. La relation de calcul est :

$$\text{Sable nr. 1} = \frac{100 - (q_1 + q_2 + q_3 + q_4)}{100} ;$$

IV. 1. a. 4. Le coefficient d'aplatissement

Définition : le coefficient d'aplatissement, coefficient volumétrique moyen, c'est le rapport entre le volume absolu des grains du gravier considéré et le volume des sphères circonscrites correspondantes.

$$M_{oyen} = \frac{V}{\frac{\pi \times d^3}{6}}$$



- Dans ce cas un faible coefficient correspond à un échantillon de gravier contenant beaucoup de plaquettes et d'aiguilles. Il est nécessaire que les coefficients d'aplatissement pour le gravier soient au moins :
  - les gravillons : V > 0,15 ;
  - les cailloux : V > 0,11 ;
- Un granulat de forme anguleuse est préjudiciable à une bonne maniabilité du béton, à la compacité et à la résistance mécanique des mortiers et bétons.

I. 1. b. Les caractéristiques mécaniques des granulats

- Les caractéristiques mécaniques des granulats ne sont pas déterminées par des essais habituels de traction ou de compression, mais par des essai tenant de reproduire certaines sollicitations propres à des usagers spécifiques des granulats, comme par exemple : le degré d'usure pour les granulats des bétons routiers.

I. 1. b. 1. L'essai Los Angeles

Définition : le principe de cet essai est la détermination de la résistance à la fragmentation par chocs et à l'usure par frottements réciproques.

- Cet essai fait l'objet des normes NFP 18.573 et l'essai concerne les pierres cassées ainsi que les grains concassés.
- La machine Los Angeles comporte un cylindre creux en acier, fermé à ses deux bouts, d'un diamètre intérieure de 711 mm et ayant une longueur intérieure de 508 mm. Le cylindre est monté sur deux axes fixés sur ses fonds et il y a une ouverture latéralement sur le cylindre pour l'introduction des granulats. La charge abrasive (d'une manière qui use par frottement) est constituée par des boulets de fonte en nombre précis.

- L'échantillon d'essai comporte un granulat propre et desséché à l'étuve, qui doit se rapprocher le plus possible de la granulométrie réelle utilisée pour les travaux. La machine est mise en route à la vitesse de 30 à 33 tours par minute, en adoptant un cycle de 500 ou 1000 tours suivant la granulométrie.
- L'échantillon est tamisé et l'on recueille le refus que l'on pèse ; on calcule ensuite le pourcentage d'usure :

$$L_0A_0 = \frac{\text{(poids initial – poids finale)}}{\text{Poids initial}} \times 100\ ;$$

- Le coefficient Los Angeles calculé à partir du passant au tamis de 1,6 mm mesuré en fin d'essai, caractérise le granulat. On peut admettre que l'essai est satisfaisant lorsque le pourcentage d'usure est inférieur à 25 ou 30%.
- Pour des granulats susceptibles d'être soumis aux effets de gel, on peut mesurer le coefficient Los Angeles après une série de 25 cycles gel/dégel (-25°C ;+25°C) et le comparer au coefficient de référence.
- En pratique un moyen de contrôle plus simple consiste de placer le granulat entre deux plaquettes d'acier de 5 mm d'épaisseur et de le soumettre à une pression statique. Dans ces conditions un gravillon 5/10 doit résister à une pression de 16 kg ; pendant que un gravillon 10/20 doit résister à une pression de 26 kg.

I. 2. La caractéristique technique du bois

I. 2. A. Les propriétés physiques

I. 2. A. 1. LA COULEUR.

Définition : c'est l'impression visuelle due aux pigments propres à chaque arbre.

- Le bois de chaque espèce d'arbre présente une couleur qui lui est propre. Elle varie légèrement avec la nature du sol, le climat, les maladies et les blessures de l'arbre.
  La couleur du bois à travers le monde varie du blanc au noir en passant par le jaune, le rouge, le violet, etc.
- L'air et la lumière influent sur la teinte des bois débités :
  - elle s'accentue pour les résineux, le chêne, l'acajou ;
  - elle s'atténue pour l'aune, le bois de rose, etc.
- Un bois altéré présente toujours une coloration anormale.

I. 2. A. 2. L'ODEUR.

Définition : Particularités perceptibles de manière olfactive.
La sécrétion des produits élaborés par l'arbre donne au bois une odeur spécifique plus au moins forte qui s'affaiblit au séchage.
L'odeur est :

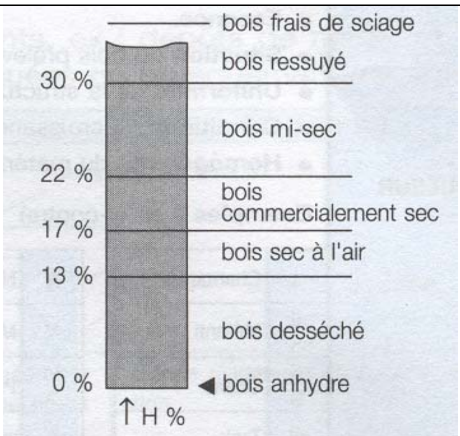
- assez forte pour le bois du cèdre, du cyprès, du thuya ;
- agréable pour la bois de rose ;
- nauséabonde lorsque le bois est altéré.

I. 2. A. 3. HYGROSCOPICITE.

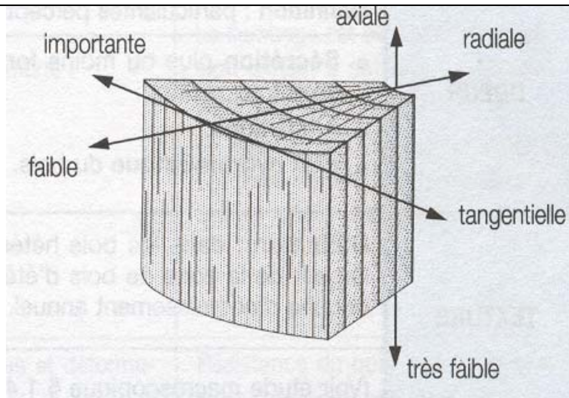
Définition : aptitude du bois à absorber l'humidité de l'air.
Facteurs influents :

- essence ;
- lieu et conditions de croissance ;
- partie de l'arbre concernée ;
- température ambiante et état hygrométrique de l'air.

L'eau dans le bois, peut être dans les formes suivantes :
- Eau libre : Remplit les cellules quand leurs membranes sont à saturation.
- Eau d'imprégnation : Située dans les membranes cellulaires.
- Eau de constitution : Avec la matière ligneuse, fait partie de la composition chimique du bois. La norme de référence (internationale) fixe à 12% le taux d'humidité.



Dénomination de références



Variations

I. 2. A. 4. Humidité

Dans l'arbre vivant, le bois est gorgé d'eau. Le bois vert est inemployable : on doit attendre qu'ils soient secs.

- Cette dessiccation demande du temps parce que l'eau, retenue par les substances colloïdales qui forment la masse du bois, ne peut être libérée qu'après transformation lente de ces substances : c'est le phénomène de vieillissement. De là l'obligation de ne mettre en œuvre le bois qu'assez longtemps après abatage ou de le vieillir artificiellement.
- Quand le bois est en équilibre d'humidité avec l'atmosphère ambiante on dit qu'il est sec à l'air : normalement il contient alors 15% de son poids d'eau. Mais constamment, en raison de sa nature chimique, la teneur en eau du bois se modifie : dans l'air humide il prend de l'eau, il en perd dans l'air plus sec. Il en résulte des variations de volume, gonflement ou retrait.
- Mais le bois étant anisotrope, gonflement et retrait sont inégaux dans les trois sens : axial, radial, tangentiel. Le bois se déforme : il joue, se voile, se gondole. L'hygroscopicité et rétractibilité qui en sont la conséquence, ont des effets fâcheux pour certains emplois, notamment en menuiserie.
- On distingue :

➢ **l'eau de constitution** combinée avec la matière ligneuse qui disparaît avec :
  - la destruction du bois ;
  - l'effet d'une chaleur prolongée.

➢ **l'eau d'imprégnation** contenue dans les membranes des cellules ;

➢ **l'eau libre** qui remplit les vides des tissus lorsque les membranes cellulaires sont saturées d'eau.

a) - L'évaluation du degré d'humidité H%.

C'est la teneur d'un bois en eau par rapport à son poids à l'état sec.

- On l'évalue :

a.1) par pesées. Pour obtenir une mesure précise, il faut connaître le poids d'éprouvettes à l'état :
  - humide ;
  - puis anhydre, après un séjour prolongé dans une étuve.

$$H\% = \frac{P_h - P_o}{P_o} \times 100$$

- P_h étant le poids de l'éprouvette à l'état humide ;
- P_o le poids de l'éprouvette à l'état anhydre.

Technique opératoire :

➢ découper au minimum trois cubes de 20 mm d'arête à plus de 60 cm de l'extrémité d'une planche (fig. ; 1 et 2);

➢ placer immédiatement les éprouvettes débarrassées de leurs bavures d'usinage dans une étuve chauffée à 100 – 105 °C, ventilée, jusqu'à l'obtention d'un poids constant (fig. 3, photo 4);

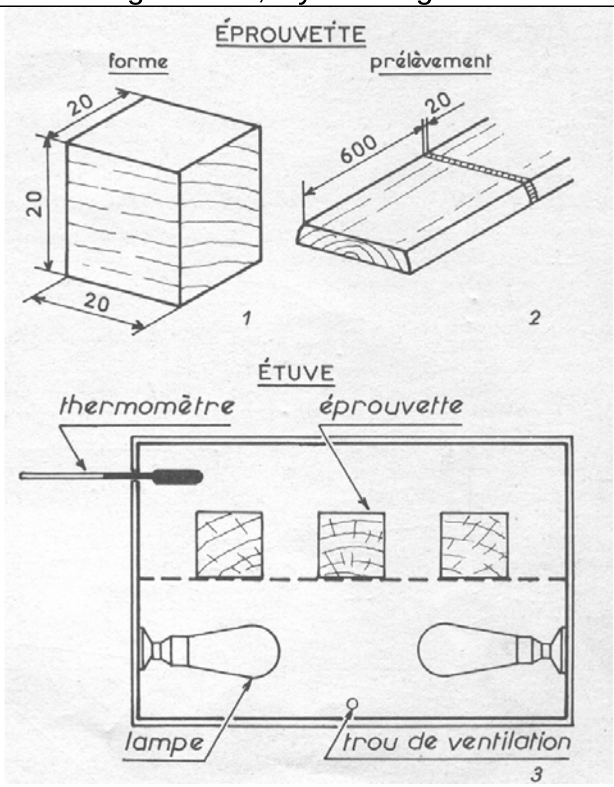
➢ peser les éprouvettes avec une balance très sensible ;

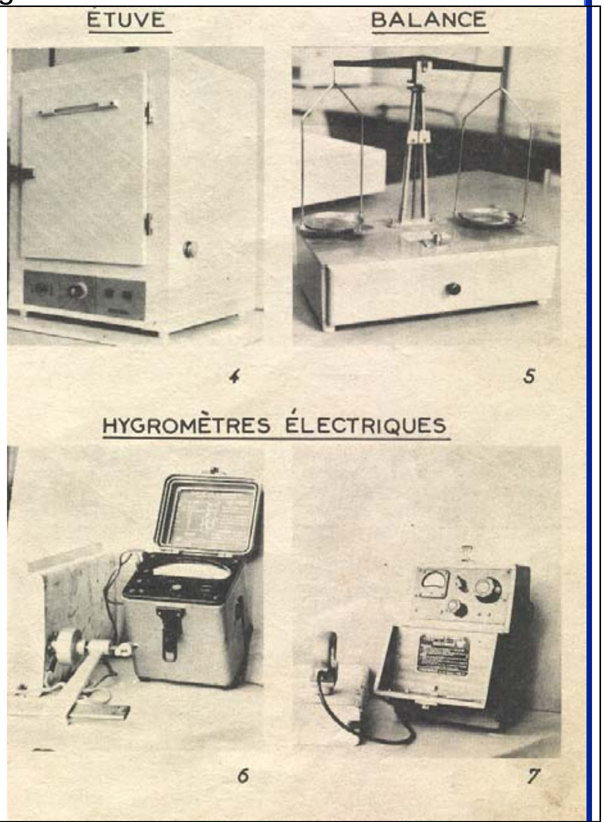
➢ calculer la moyenne arithmétique du poids des éprouvettes (conserver ces dernières dans un dessiccateur à chlorure de calcium si elles ne sont pas pesées immédiatement à la sortie de l'étuve).

Exemple : Le degré d'humidité du bois, si P_h = 30 gr, P_o = 25 gr, est :

$$\frac{30 - 25}{25} \times 100 = 20\%$$

Sur 100 Kg de bois, il y a 20 Kg d'eau et 80 Kg de matière sèche.





Remarque : L'opération décrite :

- ➢ est assez longue à réaliser ;
- ➢ elle détruit la pièce de bois puisqu'il faut détacher des cubes loin des extrémités ;
- ➢ mais elle permet d'étalonner les appareils électriques.

a.2) avec des hygromètres électriques alimentés en courant par une magnéto, le secteur ou une pile comme sur la figure ci-dessus.

- Ils donnent immédiatement le degré d'humidité des bois compris entre 6 et 25 % à 1 % près.

Ils sont utiles :

- ➢ lors de transactions commerciales ;
- ➢ au cours des opérations d'usinage et de collage pour prévenir les déformations des pièces causées par une répartition irrégulière de l'humidité.

- Ces appareils ne peuvent servir lorsque le bois :
  - ➢ est mouillé par la pluie, la rosée ou le brouillard ;
  - ➢ sort d'un séchoir ;
  - ➢ est recouvert de peinture, de vernis ou d'encaustique.

- Deux types d'hygromètres :
  - **l'hygromètre à résistance électrique**, d'un usage courant ;

La technique d'utilisation de l'appareil consiste à :

- l'étalonner pour l'essence dont le degré d'humidité est à mesurer ;
- placer les électrodes plates ou à pointes à plus de 50 cm de l'extrémité des pièces de bois ;
- lire le degré d'humidité indiqué sur un écran

  - **l'hygromètre à capacité électrique** du bois fonctionnant avec un courant à haute fréquence. Peu utilisé, Il exige pour éviter les erreurs de mesure :
    - de connaître la densité précise du bois ;
    - d'appliquer les électrodes sur des surfaces parfaitement planes.

b) - Les variations du degré d'humidité du bois.

b.1) le bois de l'arbre sur pied, contient une grande quantité d'eau qui varie avec les essences.

- Le degré d'humidité d'un bois vert provenant d'un arbre fraîchement abattu varie entre 40 et 60 % et parfois plus. Cette humidité n'est pas répartie uniformément dans toute la masse du bois : elle est plus grande au pied qu'au sommet de l'arbre, plus grande aussi dans les tissus vivants (aubier) que dans les tissus morts (duramen) où l'eau ne circule plus.

b.2) plongé dans l'eau, le bois peut en absorber jusqu'à 200 % de son poids tandis qu'il conserve des gaz dans ses tissus.

b.3) le bois exposé à l'air perd :

- d'abord, l'eau libre. On dit que le point de saturation est atteint lorsque l'eau d'imprégnation seule subsiste. Il varie autour du 30 % selon les essences ;
- puis, l'eau d'imprégnation. Sous le climat tempéré, cette eau s'équilibre après un certain temps à 13 % pendant les mois secs, à 17 % pendant les mois humides (moyenne 15 %).

c) Le degré de l'humidité d'utilisation

A chaque type d'atmosphère, correspondent :

- une température et un état hygrométrique de l'air ;
- un degré d'humidité d'équilibre des bois.

Le retrait ou le gonflement du bois sont évités lorsque le degré d'humidité indiqué ci-dessous est respecté.

Degré d'humidité	Qualification du bois	Emploi du bois
Au-dessus de 30 %	Vert	Constructions hydrauliques
30 à 23 %	Mi-sec	Constructions exposé à la pluie
22 à 18 %	Commercialement sec	Constructions dans un local ouvert
17 à 13 %	Sec à l'air	Constructions dans un local chauffé
Au-dessous de 13 %	Desséché	Constructions dans un local très chauffé
0 %	Anhydre	Pas utilisé

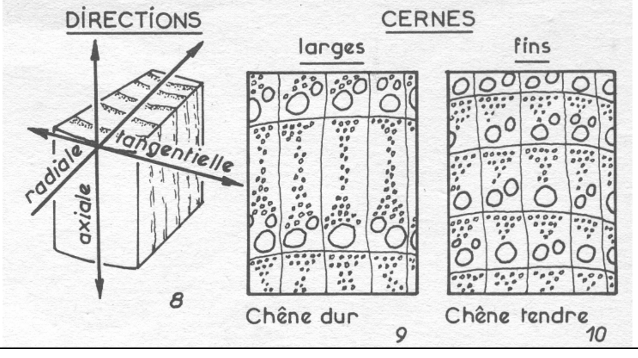
d) L'importance de connaître l'humidité

La teneur en humidité d'un bois agit :

- **sur ses qualités de conservation à l'air libre.** Au-dessus de 20 % d'humidité, la vie des champignons est favorisée.
- **sur ses propriétés mécaniques.** Au-dessous du point de saturation, les propriétés mécaniques statistiques du bois s'améliorent progressivement au fur et à mesure que le degré d'humidité diminue.
- **sur ses dimensions radiales et tangentielles**

I. 2. A. 5. LA RETRACTABILITE

- C'est la propriété du bois de diminuer de volume et de dimensions lorsque son degré d'humidité s'abaisse au dessous du point de saturation.
- Elle se manifeste différemment dans trois directions orthogonales : axiale, radiale et tangentielle.
- Lorsque le bois :
  - perd de l'humidité, son volume diminue et il prend du retrait ;
  - absorbe de l'humidité, son volume augmente et il gonfle.
- La rétractibilité du bois est en rapport avec :
  - sa densité ; un bois dur, dense, nerveux (chêne, hêtre) connaît un retrait important ;
  - la largeurs des cernes ; un chêne avec des cernes larges est plus nerveux et présente un retrait plus important qu'un chêne à accroissements fins, comme sur le schéma ci-dessous :



Les effets de la rétractabilité ne changent pas avec l'âge du bois.

On distingue :

a) Le retrait volumétrique total B%.

C'est la variation de volume entre l'état saturé et l'état anhydre du bois. Elle est sensiblement proportionnelle aux variations d'humidité :

$$\mathbf{B\ \%} = \frac{V_s - V_a}{V_a} \times 100$$

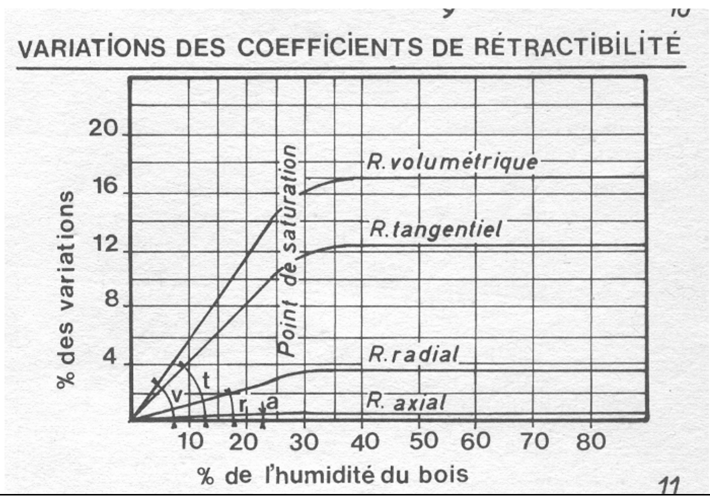
V_s = étant le volume de l'éprouvette à l'état saturé ,
V_a = le volume de l'éprouvette à l'état anhydre.

Rétractibilité totale	Qualification des bois	Utilisation
20 à 15 %	Fort retrait	Grumes à grandes fentes de dessiccation à débiter rapidement : chêne, charme, frêne.
15 à 10 %	Moyen retrait	Grumes à fentes moyennes, conservées en bois rond : résineux.
10 à 5 %	Faible retrait	Grumes à petites fentes : en menuiserie et déroulage : peuplier.

b) La valeur du coefficient de rétractibilité volumétrique (v).

Il mesure l'aptitude du bois à changer de volume. Lorsque le coefficient de rétractabilité volumétrique (v) et le retrait volumétrique (B) sont faibles, le bois se déforme peu.

Si **a** est le coefficient de rétractibilité axiale,
r …………………………………radiale,
t …………………………………tangentielle,
v …………………………………volumétrique,
la rétractibilité volumétrique est pratiquement : **v = r + t.**



- La lecture du graphique ci-dessus permet de constater que:
  a) qu'en direction axiale, le retrait est très faible et pratiquement négligeable (a)
  b) qu'en direction transversale, le retrait tangentiel (t) est une fois et demie à trois fois plus fort selon les essences que le retrait radial (r).

Valeur du coefficient de rétractibilité	Qualification des bois	Utilisation
0,55 % à 1%	Très nerveux.	Bois à débiter sur quartier : chêne dur,
0,35 % à 0,55%	Nerveux	Bois de qualité charpente : chêne
0,15 % à 0,35%	Peu nerveux	Bois de qualité menuiserie et ébénisterie : résineux, noyer

Remarque : Le degré d'humidité au point de saturation est donné par la formule :

$$S\% = \frac{B}{V}$$

dans laquelle (B) et (V) sont les grandeurs qui viennent d'être définies.

Méthodes de calcul : on utilise au minimum 3 éprouvettes cubiques de 20 mm d'arête dont on connaît le volume par :

- calcul à 1/10e près ;
- le volume d'eau ou de mercure déplacé, les éprouvettes étant enduites d'une mince couche de paraffine.

c) La répercussion du retrait.

Il se manifeste :

- **transversalement**, ce qui cause des fentes (fig.12 et 13) et modifie les dimensions des pièces de bois.

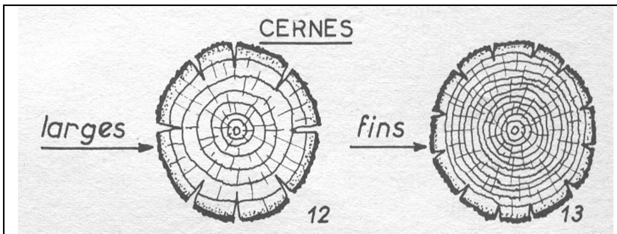
Le retrait moyen pour 1% de variation du degré d'humidité est :

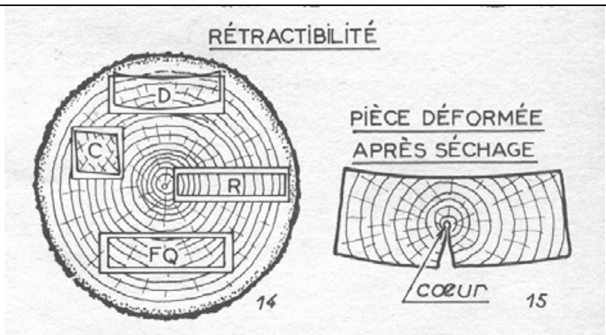
- radialement pour :

- les bois tendres (résineux, chêne tendre) = 0,10 à 0,15 % ;
- les bois durs (freine, chêne dur) = 0,15 à 0,20 %.

- tangentiellement pour :

- les bois tendres ………………………….. = 0,20 à 0,30 % ;
- les bois durs ………………………………. = 0,30 à 0,40 %.





Problème à résoudre : Quel retrait radial subit un madrier en épicéa (bois tendre) de 230 mm de large si, au cours du séchage, le degré d'humidité baisse de 25 à 15 % ?

- Le retrait est : 0,15 x (25 -15) = 0,15 x 10 =1,50 %

d'ou $\frac{1,50 \times 230}{100} = 3,45$ mm

La forme des pièces de bois (comme sur la figure ci-dessous**)**

- Les planches débitées radialement (R) se rétractent peu en largeur, 3 fois plus en épaisseur, Elles restent planes.
- Les planches débitées tangentiellement aux couches annuelles sont :
  - **sur faux quartier** (FQ). Elles restent planes et se rétractent surtout en largeur. Elles conviennent pour les surfaces larges ;
  - **sur fausse dosse** (FD). Elles se cintrent en forme de tuiles romaines à cause des éléments tangentiels plus rétractables que les éléments radiaux. Elles conviennent aux surfaces étroites.

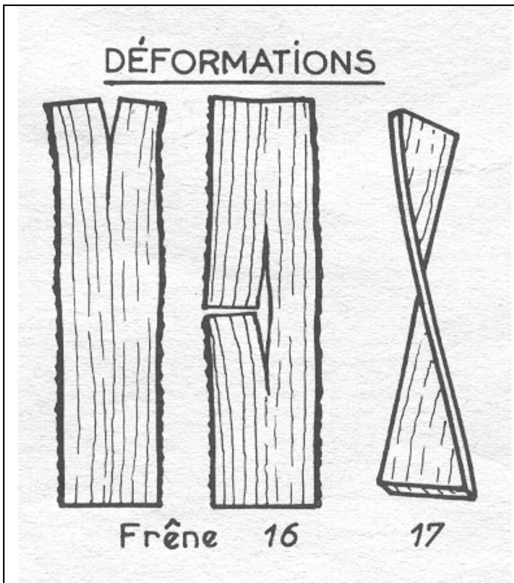
Remarques :

- ➢ Les fentes de séchage ont l'orientation des rayons ligneux.
- ➢ Les pièces de bois où reste le cœur de l'arbre se déforment au séchage et sont inutilisable (fig. 15).

b) longitudinalement.

Normalement, le retrait est de l'ordre de 0,2 à 0,3 %. Il crée des tensions internes lorsque l'humidité du bois n'est pas répartie uniformément. Cela occasionne des déformations au cours des usinages et après la mise en œuvre des bois.

Le retrait anormal de 1 à 2 % de certains bois (veine rouge, bois de tension et de compression) donne des pièces gauches inutilisables (fig. 16 et 17).



D - Les remèdes à la rétractabilité.
Ils consistent à :

- débiter les bois nerveux sur quartier ;
- utiliser des bois dont le degré d'humidité est équilibré avec l'état hygrométrique de l'air ambiant ;
- mettre en œuvre, pour certains travaux, des bois dont les retraits radial et tangentiel sont sensiblement les mêmes ; ex. : l'acajou, le noyer, le tilleul ;
- laisser du jeu dans les embrèvements en bois de fil ;
- enrober d'une couche protectrice les bois mis en œuvre.

I. 2. A. 6. LA DENSITE OU POIDS SPECIFIQUE APPARENT

C'est le rapport de la ***masse*** au ***volume*** mesuré au même état d'humidité. On distingue deux termes :

- **la densité réelle du bois,** celle de la cellulose et de la lignine qui constituent les parois des cellules : 1,54 environ ;
- **la densité correspondant au volume du bois**. Elle est inférieure à la densité réelle à cause des vides cellulaires.

Elle varie avec les essences, leur condition de vie et leur degré d'humidité.

a) L'évaluation de la densité du bois

A l'aide d'éprouvettes de 20 mm d'arête, on calcule :

- la densité D_H à un degré d'humidité H au –dessous du point de saturation en appliquant la formule :

$$D_H = \frac{M_H}{V_H}$$

$\mathbf{M_H}$, étant la masse en grammes de l'éprouvette,
$\mathbf{V_H}$, le volume en cm de l'éprouvette.

- la densité D'_H à un degré d'humidité H' en connaissant le degré d'humidité H du bois avec la formule :

$$D'_H = D_H \left[1- \frac{(1 - v)(H - H')}{100} \right.$$

- **v**, étant le coefficient de rétractabilité,
- **H**, le degré d'humidité.

- la densité D_{15} au degré d'humidité de15% avec la formule :

$$D_{15} = D_H \left[1- \frac{(1 - v)(H - 15)}{100} \right]$$

b) La valeur de la densité des résineux et des feuilles

Les valeurs usuelles pour la densité des différents types du bois, on peut le trouver dans le tableau suivant :

Densité à 15%	Qualification des bois	Exemples à titre indicatif
	Résineux	
Au-dessous de 0,4	Très légers	Pin Weymouth
0,4 à 0,5	Légers	Epicéa, sapin
0,5 à 0,6	Mi-lourds	Pin sylvestre
0,6 à 0,7	Lourds	Pin de laricio, mélèze
Au-dessous de 0,7	Très lourds	Pitchpin
	Feuillus	
Au-dessous de 0,5	Très légers	Tilleul, okoumé
0,5 à 0,65	Légers	Peuplier, aune, avodiré
0,65 à 0,80	Mi-lourds	Chêne, frêne, hêtre,
0,80 à 1,00	Lourds	Charme, sorbier,
Au-dessous de 1,00	Très lourds	Azobé.

c) Les variations de densité.

La densité peut varier selon le point du prélèvement.

Les causes en sont :

- la vie de l'arbre influencée par la nature du sol, le climat, l'altitude et le traitement de la forêt ;
- le développement plus ou moins important du bois de printemps (initial) et celui d'été (final) dans les cernes ;

On constate des variations de densité suivant :

- ❑ la largeur des cernes ;
- chez les résineux, avec :
  - des cernes fins et réguliers, la densité est forte,
  - des cernes larges, elle est plus faible.
- chez les feuillus :
  - homogènes, la densité des bois est indépendante de la largeur des cernes,
  - hétérogènes, elle augmente avec l'épaisseur du bois d'été.
- ❑ la partie de l'arbre :
- le bois de la patte est dense ;
- le bois des branches :
  - de résineux est plus dense que celui du tronc ;
  - de feuillus est moins dense que celui du tronc.

I. 2. A. 7. LA DILATATION .

- Sous l'influence de la chaleur, le bois se dilate mais en même temps, il prendre du retrait avec une perte d'humidité. La dilatation du bois est négligeable, le retrait étant plus important.

- Le coefficient de dilatation **K** du bois est le pourcentage de la variation dimensionnelle % (sens axial, radial et tangentiel) pour un écart de température de 1°C.

$$\mathbf{K} = \frac{n}{l\,(t_2 - t_1)}$$

l - étant la longueur initiale,
n - la variation de longueur,
$t_2 - t_1$ est l'écart de température.

- Le coefficient de dilatation est huit à dix fois plus important dans le sens transversal que dans le sens axial.

Matériaux	**Coefficient de dilatabilité**
Bois (sens radial ou tangentiel)	$0{,}514 \times 10^4$
Bois (sens axial)	$0{,}060 \times 10^4$

Remarque : La faible dilatation du bois dans le sens axial fait qu'on l'utilise pour construire :

- des instruments de mesure et des appareils scientifiques ;
- des charpentes qui n'exercent pas une forte poussée sur les murs en cas d'incendie comme les charpentes métalliques.

I. 2. A. 8. LA CONDUCTIBILITE THERMIQUE.

Le bois est mauvais conducteur de la chaleur à cause :

- de sa structure cellulaire qui emprisonne de l'air,
- de sa composition cellulosique.

La conductibilité thermique du bois varie avec les essences, le degré d'humidité et le sens de la transmission. Elle est plus grande dans le sens axial que dans le sens transversal.

1° Le coefficient de la conductibilité thermique λ (lambda). C 'est la quantité de chaleur qui traverse un mètre carré de bois d'un mètre d'épaisseur, par heure, pour une différence de température de 1°C entre les deux faces, exprimée en Watt/m°C (1W = 0,860 kcal/h, 1 kcal/h = 1,163 W).

Matériaux	Coefficient en kcal/h
Panneaux de fibre de bois	0,03 à 0,04
Bois de résineux (sens axial)	0,15 à 0,20

2° Le Coefficient de conductibilité (**C**) caractérise l'échange thermique en fonction de l'épaisseur de la pièce de bois.

$$C = \frac{\lambda}{e}$$

Où (e) est l'épaisseur, en mètres.

Exemple : Le Coefficient de conductibilité d'un panneau de fibres de 1 cm d'épaisseur est :

$$\frac{0,03}{0,01} = 3$$

I. 2. A. 9. LA CONDUCTIBILITE PHONIQUE.

Lorsqu'une énergie sonore frappe un corps séparant deux milieux :

- une partie de l'énergie est réfléchie ;
- une partie est transmise dans l'autre milieu ;
- une partie est absorbée par le corps lui-même.

L'amortissement du bruit avec quelques matériaux bois.

Matériaux	Epaisseur, en (cm)	Absorption du bruit en (%) de la puissance reçue suivant les fréquences.		
		256	1 024	4 096
Résineux massif	2,00	12	8	11
Panneaux de fibres	1,20	21	30	30

Le bois et ses dérivés sont intéressants pour amoindrir les phénomènes d'écho et de résonances.

3.1.10 LA CONDUCTIBILITE ELECTRIQUE.

Le bois sec est mauvais conducteur de l'électricité. Sa résistivité décroît avec une élévation du degré d'humidité pour rester constante au-dessus du point de saturation.

Degré d'humidité en H %	Résistivité transversale en mégohms/cm
7	22 000

Pour un même degré d'humidité, la résistance électrique du bois dépend de l'essence, de la densité et du sens dans lequel les mesures son faites.

Elle est 2 à 4 fois plus importante dans le sens axial que dans le sens transversal, plus forte tangentiellement que radialement.

La résistance électrique croît avec la densité des bois. Elle est plus élevée pour les essences qui contiennent des résines et des huiles que pour celles qui en sont dépourvues.

Le bois sec :

- enrobé de peinture ou de verni convient pour un courant à basse tension ;
- bakélisé convient pour un courant à haute tension.

I. 2. B. Les propriétés mécaniques du bois

- Ces propriétés sont étudiées expérimentalement par des essais en laboratoire avec des appareils appropriés.
- Les essais permettent de déterminer :
  - la contrainte à la rupture en faisant agir une force croissante jusqu'à la rupture ; elle est exprimée en kilogrammes par centimètre carré sur la section de la pièce (kgf/cm^2) ;
  - la contrainte admissible ou fatigues de sécurité (R) utile pour calculer les sections des pièces mises en œuvre.

- Au cours de ces essais, l'on tient compte :

  1° De la densité du bois – qui peut varie suivant **:**

  a) la vie de l'arbre qui se déroule sur un très long temps ;

  b) la structure différente du bois de printemps et du bois d'été.

  2° De l'humidité - la résistance mécanique du bois est :

  a) constante au-dessus du point de saturation ;

  b) variable au-dessus de ce point. Elle diminue avec une augmentation du degré d'humidité entre l'état anhydre et le point de saturation.
- Par exemple, en compression axiale, la résistance du bois baisse de 4% pour 1% d'humidité en plus.

Remarque : Un coefficient de correction dit tenue à d'humidité est appliqué pour les calculs de compression axiale et de flexion lorsque les éprouvettes présentent un degré d'humidité inférieur à 15%. Pour les autres essais, on néglige cette correction si les éprouvettes possèdent un degré d'humidité voisin de 15%.

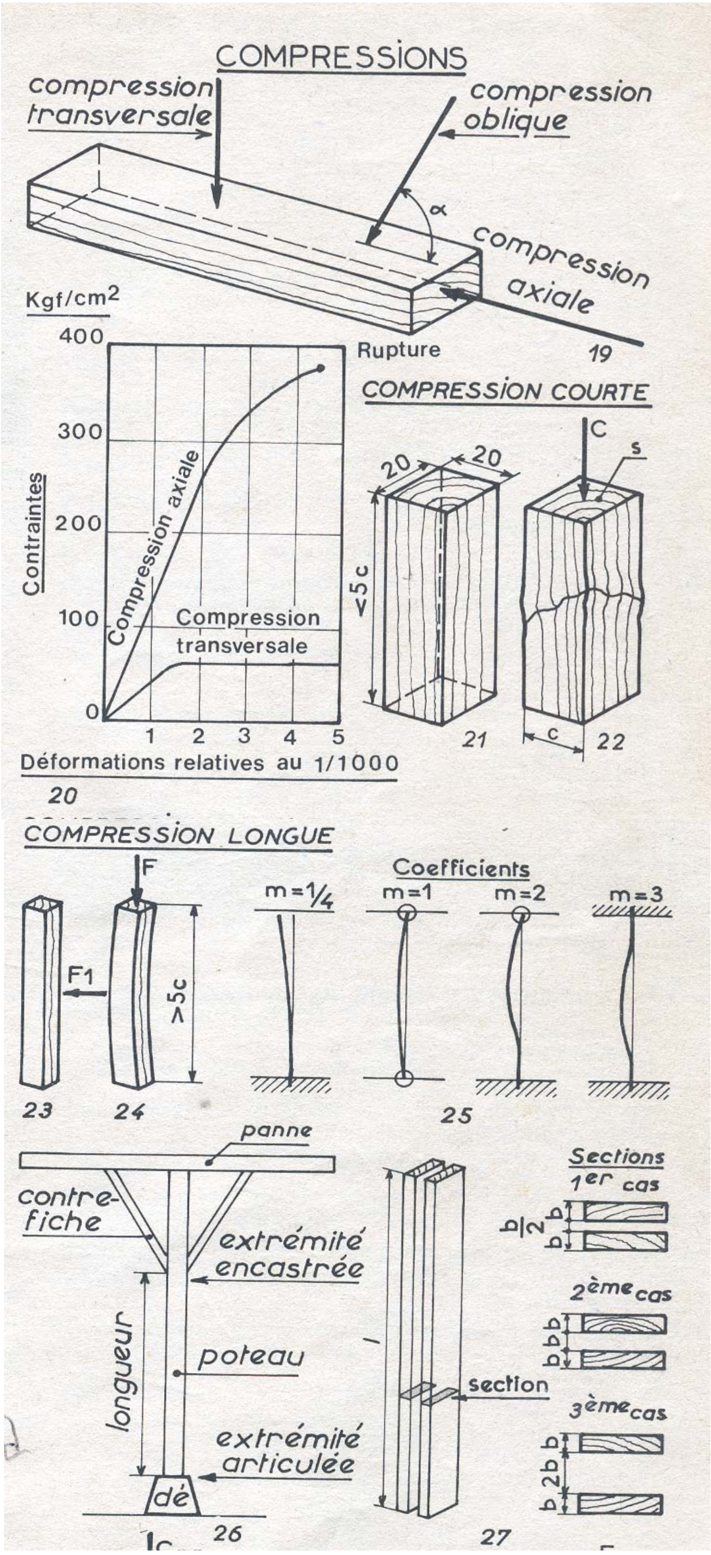
I. 2. B. 1. LA RESISTANCE A LA COMPRESSION

- L'anisotropie du bois se manifeste lorsqu'il subit les effets de compression :
  - dans le sens axial, «en bout», le bois se révèle dur et résistant (fig.19) ;
  - dans le sens transversal, «de flanc», le bois est assez tendre et peu résistant

I. 2. B. 1. a. LA COMPRESSION AXIALE - dite « en bout ».

<u>Pour les pièces courtes</u> – quand leur longueur ne dépasse pas cinq fois la largeur du plus petit côté.

- **La méthode d'essai** - consiste à écraser un prisme de base carrée mesurant 2 cm de côté et 6 cm de hauteur entre les plateaux d'une machine qui donne la charge de rupture de l'éprouvette comme sur la figure ci-dessous :



- L'éclatement de celle-ci se produit :
  - selon un plan de faible résistance (plan radial) ;

- par glissement et cisaillement des éléments suivant un plan oblique à l'axe (fig.22, ci-dessus) ;
- ou par la combinaison des deux phénomènes ci-dessus ;

- **Trois grandeurs sont à mesurer :**

  - **la résistance à la compression axiale –** dans ce cas la contrainte de rupture (C) en Kgf/cm² est donnée par la formule :

$$C = \frac{N}{S}$$

N - étant la compression en Kg, S, la surface en cm², perpendiculaire à la direction de l'effort N.

- La correction de la contrainte pour un degré d'humidité de 15% se fait en appliquant la formule suivante :

$$C_{15} = Ch\,[1+c_H(H-15)]$$

Ch = est la résistance à la compression au degré d'humidité H ;
c = le coefficient de tenue à l'humidité expérimentalement qui est de 0,04 en moyenne.

- Cette correction permet d'étudier l'influence du bois d'été plus ou moins développé sur la résistance du bois.

  - **la cote de qualité spécifique (Sp)** du bois est donnée par la relation entre la résistance à la compression et la densité :

$$Sp = \frac{C_{15}}{100 \times D^2_{15}}$$

- Compris entre 9 et 20, elle reste à peu près fixe pour chaque essence. Les valeurs les plus élevées caractérisent les bois qui résistent le mieux à la compression.
- Par valeur décroissante, ce sont :
  - les résineux tendres, l'épicéa, le sapin (cote 18 à 20) ;
  - enfin, les feuillus durs (cote 9 à 14).

  - **la cote de qualité statique (S_t).**

$$S_t = \frac{C_{15}}{100 \times D_{15}}$$

- Cette qualité permet de classer les bois pour répondre aux exigences de l'industrie. Les bois ayant une cote supérieure à 8 sont recherchés pour les constructions mécaniques.

Remarque : Pratiquement, on utilise :

$$\frac{S_t}{S_p} = D$$

Matériaux	Rapport de la résistance axiale à la densité (Kgf/mm²)
Epicéa de montagne	3,8/0,42 = 9

Pour les pièces longues – quand leur longueur dépasse cinq fois la plus petite dimension transversale.

- Dans ce cas la rupture des pièces longues se fait par **flambage** ou **flexion** latérale sous une charge d'autant plus faible que leur élancement est plus grand.
- Les pièces longues peuvent :
  - être simples ou composées ;
  - supporter une charge centrée ou excentrée ;

Résineux

Catégories	Résistance C_{15} Kgf/Cm²	Cote statique $S_t = C_{15} / 100\ D_{15}$		
		Tendres	Mi durs	Durs
Inférieure Moyenne Supérieure	250-350 350-450 450-600	< 8 8 à 9.5 > 9.5	< 7 8 à 9.5 > 8.5	< 6 6 à 7.5 > 7.5
Cote spécifique	$S = C_{15}\ 100\ D^2_{15}$	20 à 15	15 à 12,5	12,5 à 10

Feuillus

Catégories	Tendres		Mi durs		Durs		Très durs	
	C_{15}	S_t	C_{15}	S_t	C_{15}	S_t	C_{15}	S_t
Inférieure Moyenne Supérieure	Kgf/cm² 200-300 300-400 400-600	< 7 7 à 8 > 8	Kgf/cm² 275-375 375-475 475-600	< 6 6 à 7 > 7	Kgf/cm² 400-500 500-700 700-800	< 6 6 à 7 > 7	Kgf/cm² 500-600 500-800 800-1000	< 7 7 à 8 > 8
Cote spécifique	20 à 12,5		12,5 à 9		9 à 8		< 8	

- **les pièces sont simples avec une charge centrée.**

Dans ce cas leur résistance à la compression (F) se calcule comme pour les pièces courtes en affectant les contraintes admissibles d'un coefficient de réduction (k) qui dépend de l'élancement.

$$\mathbf{F} = \mathbf{K} \times \mathbf{SR_c}$$

S - est la section de la pièce, $\mathbf{R_c}$ la contrainte admissible en compression courte, **K** le coefficient de flambement de Rankine :

$$K = \frac{1}{1 + \frac{A}{m}\lambda^2}$$

A - est un coefficient égal à 2×10^{4},

m - un coefficient qui dépend de la nature des appuis (fig.25).

Si on a : **m** = $^1/_4$, la pièce est encastrée à une extrémité et libre à l'autre ;
m = 1, la pièce est articulée à ses deux extrémités ;
m = 2, la pièce est encastrée à une extrémité, articulé à l'autre ;
m = 4, la pièce est encastrée à ses deux extrémités.

λ - (lambda) est l'élancement de la pièce :

$$\lambda = \frac{Lf}{\rho}$$

$\mathbf{L_f}$ - est le coefficient de flambement ;

ρ **(ro) -** est le rayon de giration minimum de la section donnée par :

$$\rho^2 = \frac{I}{S}$$

I - est le moment d'inertie de la pièce ;

S - la section de la pièce.

Les valeurs de **K** en fonction de l'élancement (λ) sont donnés ci-dessous :

Elancement de la pièce λ = Lf/ ρ	Valeurs correspondantes de L_f/a □	L_f/d ○	Valeurs de K m= 1/4	m= 1	m= 2	m= 4
10	2,9	2,5	0,93	0,98	0,99	0, 00
20	5,8	5,0	0,76	0, 93	0,96	0, 98
30	8,7	7,5	0,58	0,85	0,92	0, 96
40	11,5	10,0	0,44	0,76	0,86	0, 93
50	14,4	12,5	0,33	0,67	0,80	0, 89
60	17,3	15,0	0,26	0,58	0,74	0, 85
70	20,2	17,5	0,20	0,51	0,67	0, 80
80	23,1	20,0	0,16	0,44	0,61	0, 76
90	26,0	22,5	0,13	0,38	0,55	0, 71
100	28,9	25,0	0,11	0,33	0,50	0, 67
120	34,6	30,0	0,08	0,26	0,41	0, 58
140	40,4	35,0	0,06	0,20	0,34	0, 51
160	46,2	40,0	0,05	0,16	0,28	0, 44
180	52,0	45,0	0,04	0,13	0,24	0, 38
200	57,7	50,0	0,03	0,11	0,20	0, 33

- **les pièces sont composées avec des charges centrées.**
  A la rigueur, leur résistance à la compression se calcule comme pour les pièces simples en les considérant rapprochées jusqu'au contact (fig.27).

I. 2. B. 1. b. LA COMPRESSION TRANSVERSALE dite de « flanc ».

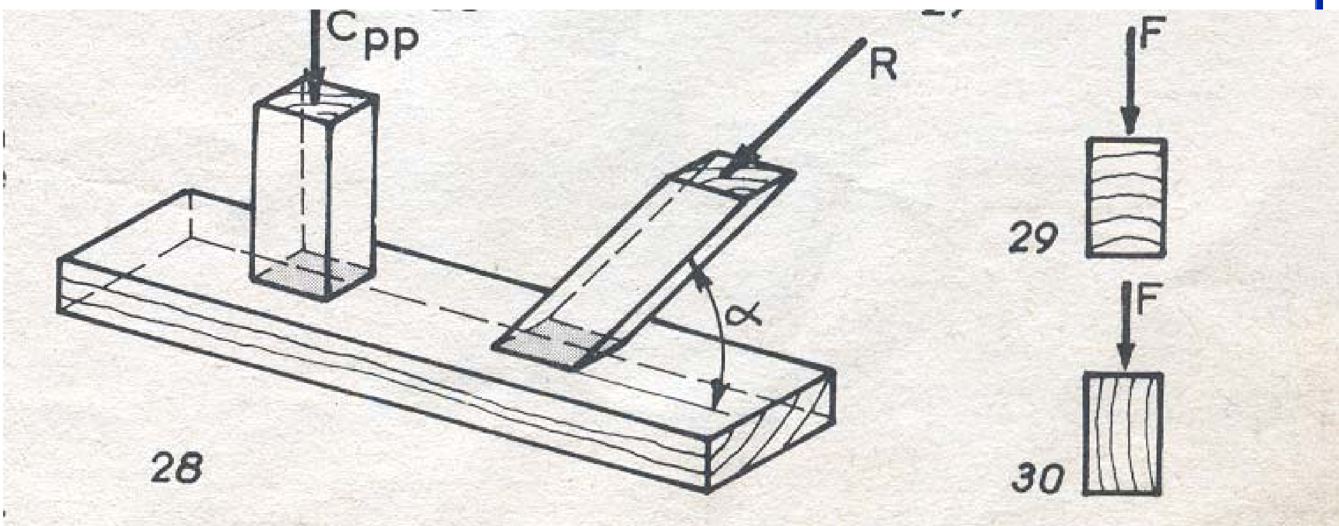
- **La compression perpendiculaire aux fibres du bois** (fig.28). Elle est très faible comparé à la résistance à la compression axiale, inférieure de trois à cinq fois. Elle est moindre en direction radiale (fig.29) qu'en direction tangentielle (fig.30).
  La phase des déformations est très courte (fig.20).La contrainte qui correspond à ce palier mesure la résistance à la compression transversale :

$$C_{pp15} kgf/cm^2 = 300\ D^2_{15}$$

- **La compression oblique aux fibres du bois (fig. 28).**
  Sa valeur est intermédiaire entre celle de la compression axiale et celle de la compression transversale. Elle est donnée par la formule de Hankinson :

$$R_\alpha = \frac{R_c R'_c}{R_c \sin^2\alpha + R'_c \cos^2\alpha}$$

R_α = représente la valeur de la contrainte cherchée,
α = l'angle d'inclinaison des fibres,
Rc = la contrainte admissible en compression axiale,
R'c = la contrainte admissible en compression transversale.



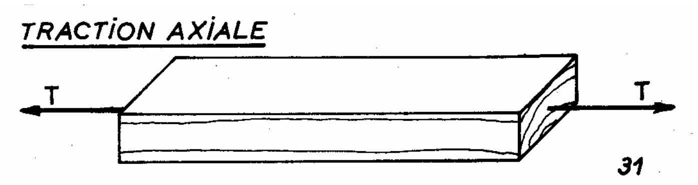
I. 2. B. 2. Résistance à la traction

- **La résistance à la traction axiale -** le bois résiste très bien à la traction axiale et le point de rupture se situe toujours aux liaisons.

Aussi est –il bon :

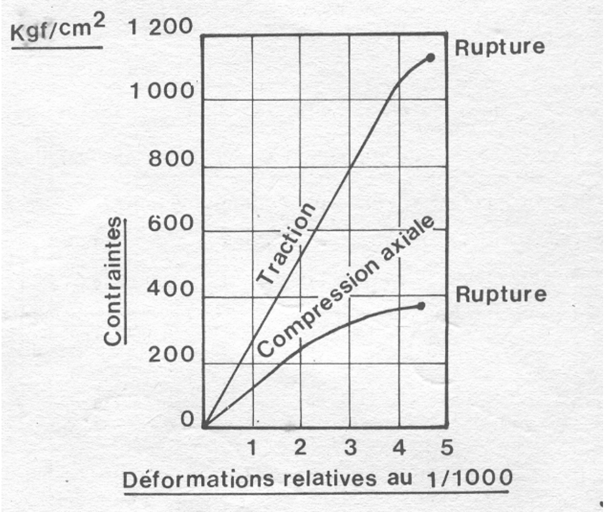
- d'exécuter les liaisons avec grand soin ;
- de renforcer celles qui travaillent à la traction.

Pratiquement, on prend :

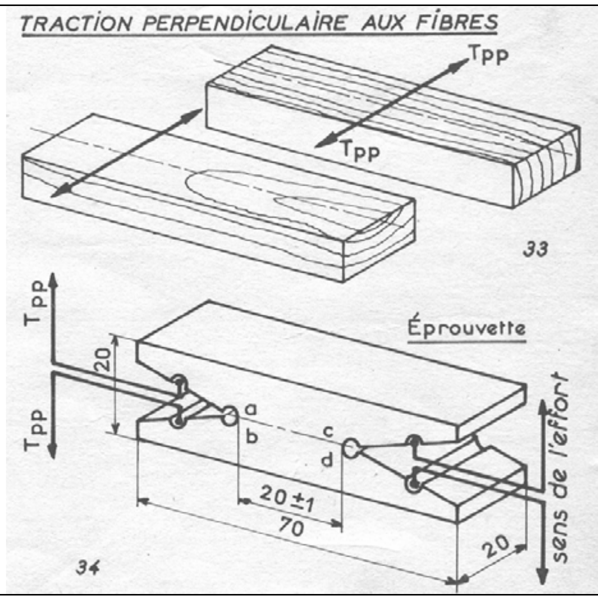


$$T_{15} = 1{,}5 \times C_{15}$$

Remarque : La résistance à la traction est 2 à 3 fois plus forte que la résistance à la compression axiale (fig. 32).



32



- **La traction perpendiculaire aux fibres** (fig.33). Les fibres du bois résistent très bien à la traction transversale mais non les matières qui les unissent.

Cette traction caractérise :

-l'adhérence mutuelle des éléments du bois,

-la résistance mécanique des plans de collage.

Les grandeurs à mesurer sont :

a) **la résistance à la traction perpendiculaire aux fibres (fig. 34)**

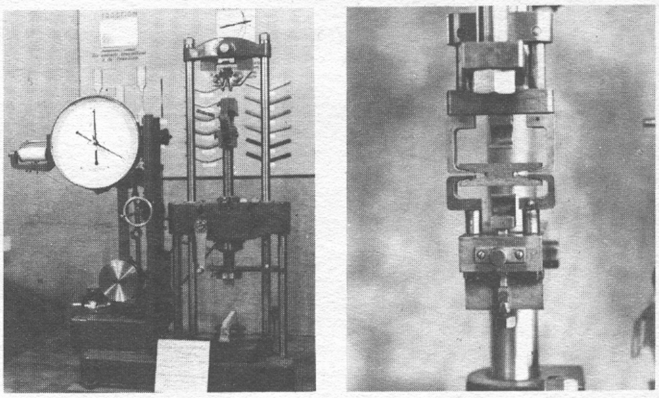
T_{pp} est toujours en **Kgf/cm²**

b) **la cote d'adhérence -** qui est définie en faisant le rapport de la résistance indiqué ci-dessus et la densité :

$$\frac{Tpp\ 15}{100 \times D15}$$

Qualification des bois	Valeur de la cote d'adhérence	Echelle de comparaison
Peu adhérents	0,15 à 0,30	Bois de fente : résineux, chêne, châtaignier.
Moyennement adhérents	0,30 à 0,45	Bois d'usage courant.
Très adhérents	0,45 à 0,60	Bois résistant : orme, tortillard, noyer.

TRACTIONS



Machine universelle 35

I. 2. B. 3. Résistance à la flexion

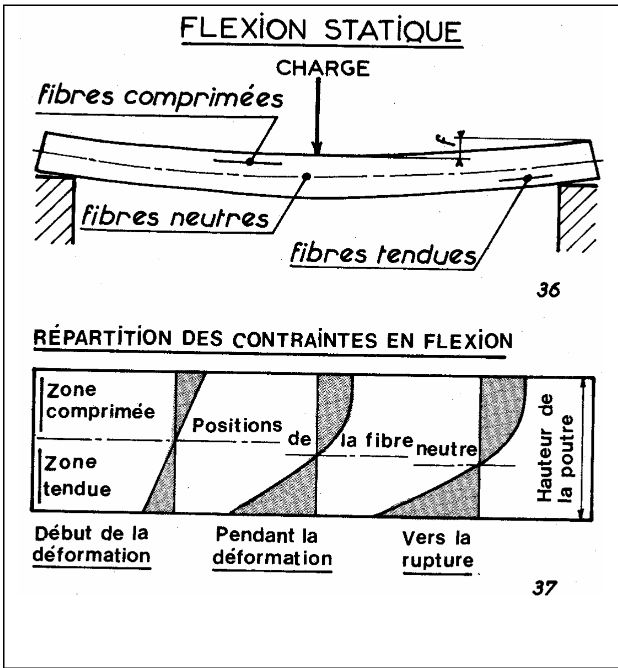
- **La flexion statique (fig. 36).**

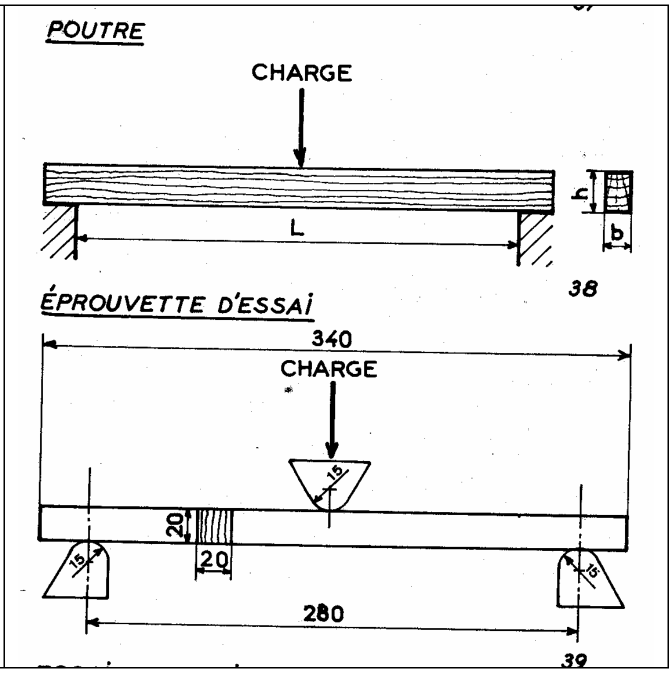
Une pièce chargée progressivement s'incurve en décrivant une **flèche** de plus en plus grande, puis se rompt.

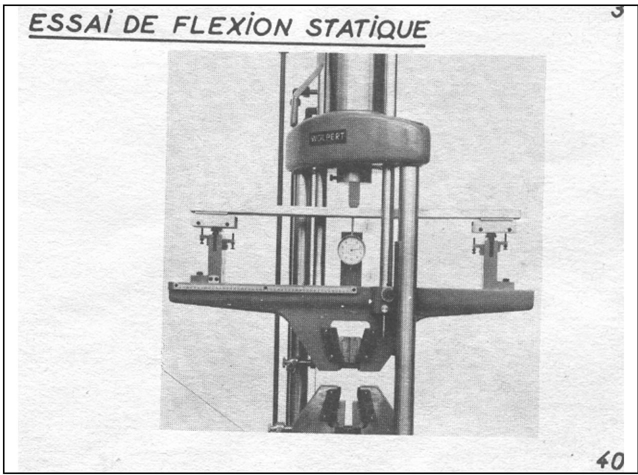
Toutes les fibres d'une poutre fléchie ne réagissent pas de la même manière. Celles de la partie :

- concave travaillent à la compression,
- convexe sont tendues et s'allongent,

- Entre les fibres comprimées et les fibres tendues, existent des fibres neutres qui ne subissent pas de variations de longueur.
- Situées théoriquement dans l'axe de la pièce, elles se rapprochent de plus en plus des fibres tendues sous une charge croissante (fig. 37).







a) la fatigue de rupture à la flexion (fig. 38). Le bois n'obéit pas aux lois classiques qui s'appliquent aux matériaux isotropes en flexion.

On utilise la formule de Monnin :

$$FH = \frac{3\,PL}{2\,bh^n}$$

FH - caractérise la fatigue de rupture à la flexion au degré d'humidité H,
P - est la charge de rupture de l'éprouvette en Kg,
L - la portée en cm, **n** l'exposant de forme pour les bois :

1er choix $\frac{10}{6} = 1,66$

2e choix $\frac{9}{6} = 1,50$

3e choix $\frac{8}{6} = 1,33$

Méthode expérimentale :

- une éprouvette (fig. 39),
- une machine (photo 40).

Remarque : Le calcule de correction du résultat obtenue pour une variation d'un degré d'humidité se fait en appliquant la formule :

$$F15 = FH\,[1 + c'\,(H - 15)]$$

- C'est la tenue à l'humidité pour la flexion, valeur : 0,02.

b) la cote de flexion qualifie le classement du bois. Elle est donnée par le rapport entre le chiffre de fatigue de rupture à la flexion F15 et la densité D15.

$$\frac{F15}{100 \times D15}$$

Elle permet de qualifier les bois.

Qualification des bois	Cote de flexion	Utilisation
Faible	10 à 15	Bois inaptes à la charpente.
Moyenne	15 à 20	Bois peu aptes à la charpente.
Forte	20 à 25	Bois de charpente (épicéa, sapin).

c) la cote raideur est obtenue en faisant le rapport entre la portée **L** et la flèche de rupture **f**.

Remarque : Les bois de même densité ne présente pas la même résistance à la flexion et prennent une flèche différente.

- Elle est :
  - importante et la pièce quitte ses appuis sans casser, par ex. : pour le frêne,
  - moyenne sans que la pièce casse ni quitte ses appuis, par ex. : pour le chêne, faible et la pièce se rompt par ex. : pour le hêtre ;

Qualification des bois	Cote de raideur	Utilisation
Raide	50 à 40	Bois échauffés ou noueux sans emploi.
Moyenne	40 à 30	Bois charpente (résineux).
Elastique	30 à 20	Bois de cintrage.

d) la cote de ténacité est donnée par le rapport entre la résistance de rupture à la flexion **F15** et la résistance à la compression **C**15 :

$$\frac{F15}{C15}$$

- Le résultat obtenu permet de classer las bois résistant à la flexion compte tenu de leur poids.

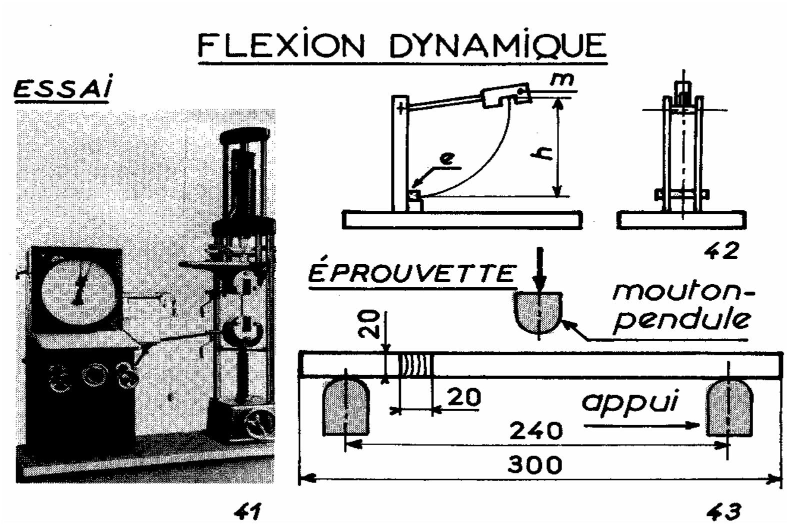
Qualification des bois	Cote de ténacité	Utilisation
Peu tenace	< 2	Ebénisterie, agencement.
Moyennement tenace	2 à 3	Menuiserie soignée.
Très tenace	3 à 4	Bois de cintrage.

- **La flexion dynamique.**

- Le bois est un matériau dont la résistance au choc ou résilience est grande. Il importe de la connaître pour l'utilisation correcte du bois.
- Les essais de rupture totale permettent :
  - de classer rapidement les bois d'après leur qualités mécaniques,
  - de déceler rapidement les bois altérés, mal étuvés ou ayant subi une mauvaise imprégnation (ignifugation, bakélisation, etc.).
- L'essai se fait aisément avec :
  - Un mouton pendule d'un pois de 10 Kg (photo 41, fig. 42),
  - Deux appuis distants de 24 cm,
  - Sur une éprouvette de section carrée de 2 cm de côté (fig. 43).

Phases d'essai :

- placer l'éprouvette contre deux appuis de manière que l'effort soit dirigé dans le sens tangentiel du bois,
- soulever le mouton pendule à 1m de hauteur,
- le laisser retomber ; il casse l'éprouvette à son passage.



On connaît ainsi :

- L'énergie totale obtenue par le produit du poids du mouton et sa hauteur de chute,
- L'énergie inutilisée donnée par la lecture sur cadran de la remontée du mouton après son impact avec l'éprouvette.

▪ Les grandeurs à mesurer sont :

a) le travail total de rupture ou résilience - **W,** exprimé en **kgm ;**
C'est la différence entre l'énergie totale et l'énergie inutilisée.

b) le coefficient de résilience. Formule :

$$k = \frac{W}{b \times h\ 10/6} = \frac{W}{6{,}35}$$

W - est le travail total de rupture de l'éprouvette,
6,35 - est la valeur numérique de b x h 10/6 pour l'éprouvette

c) la cote dynamique :

$$K/D^2$$

D^2- est la densité de l'éprouvette au moment de l'essai.

<u>Comparaison entre les différentes essences.</u>

Qualification des bois	**Cote dynamique**	**Echelle de comparaison**
Fragiles ou cassants	< 0,8	Bois inaptes aux emplois mobiles : cèdre, pin maritime.
Moyennement résilience	0,8 à 1,2	Bois pouvant être soumis aux chocs et vibration : chêne,
Résilients	> 1,2	Bois pour aviation, manches d'outils : Epicéa, sapin, frêne.

d) la réaction instantanée sur un appui, **R** en **kgf.**
Le chiffre lu sur l'appareil de mesure posé sur les appuis est supérieur d'environ 25% à celui obtenue aux essais statiques.

Remarque : il est très difficile de passer de la résistance d'une éprouvette à celle d'une pièce de bois quelconque.

I. 2. B. 4. LA FISSILITE

C'est l'aptitude des matériaux fibreux au fendage, à se diviser dans le sens longitudinal, sous l'action d'une force.

Le décollement des éléments du bois se produit suivant des surfaces peu résistantes : rayons ligneux, zones de fibres, etc.

Le bois humide est moins fissile que le bois sec.

L'adhérence des fibres dépend de la structure du bois et des conditions de vie de l'arbre.

La propriété des bois au fendage procure les merrains.

Les bois :
- très fissiles sont l'épicéa, le mélèze, la sapin, le châtaignier,
- fissiles sont le pin, le chêne, le frêne, le hêtre,
- difficiles à fendre sont le charme, le bouleau, l'érable.

Les essais permettent de déceler les bois échauffés.

Méthodes d'essais. On utilise :
- Une machine équipée de mors pour exercer une traction perpendiculaire aux fibres,
- Une éprouvette (fig. 44).

Les grandeurs à mesurer sont :

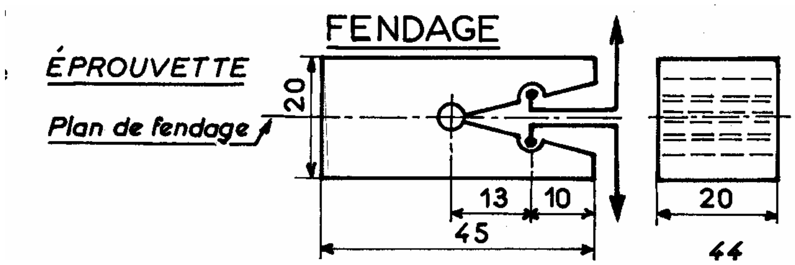
a) résistance au fendage ou Fend15

Sa valeur est calculée conventionnellement en kg par cm de la largeur fendue à la moitié de la charge totale de rupture.

Cette résistance rapportée à la densité donne la cote de fissilité.

b) la cote de fissilité :

$$\frac{\textbf{Fend15}}{\textbf{100 X d15}}$$; permet de comparer et de qualifier les bois.

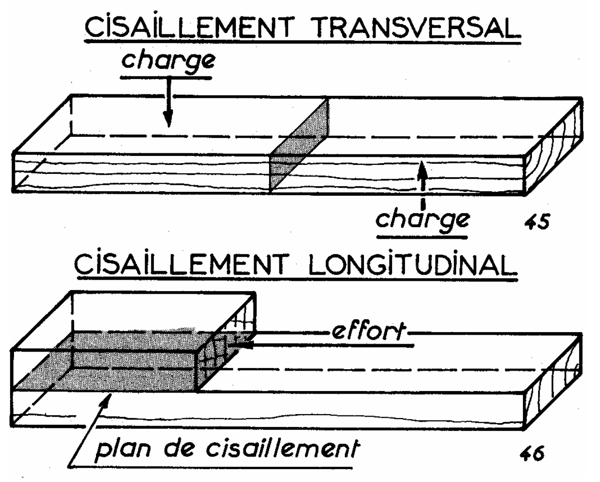


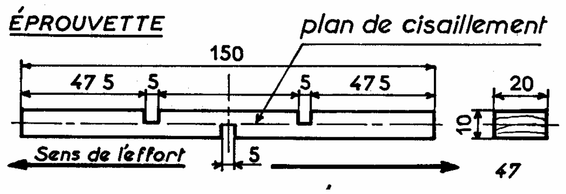
Qualification des bois	Valeur de la cote de fissilité	Echelle de comparaison
Très fissiles	0,10 à 0,20	Bois de fente.
Moyennement fissiles	0,20 à 0,30	Bois d'usage courant.
Peu fissiles	0,30 à 0,40	Bois pour des usages spéciaux.

I. 2. B. 5. Résistance au cisaillement

On distingue :

- **Le cisaillement transversal** (fig. 45).
  Sous l'effort d'une pression transversale avant que l'effet de cisaillement devienne dangereux.
- **Le cisaillement longitudinal**.
  La rupture du bois se fait parallèlement aux couches annuelles qui glissent les unes les autres surtout suivant un plan radial. Elle est moindre lorsque le plan est tangentiel.
  Cet effort fait périr les pièces de bois qui comportent une interruption de fibres par une entaille, un trou (fig. 46).





Contrainte de rupture en relation avec la densité du bois.

Essences	9 Densité	Rapport à la den	Résistance C_{15} kgf/cm²
Résineux	0,400 à 0,600	70 D15	30 à 40
Feuillus tendres	0,500 à 0,700	80 D15	40 à 45
Feuillus durs	0,700 à 0,900	90 D15	60 à 80

Méthode d'essai a deux phases :

- fixer une éprouvette (fig. 47) avec les mors d'une machine,
- exercer une traction sur l'éprouvette jusqu'à sa rupture.

- Les grandeurs à mesurer sont :

a) la résistance au cisaillement longitudinal.

Cs15 exprimé en Kgf/cm²

Sa valeur est décidée conventionnellement égale au quart de la charge totale de rupture.

b) la cote de cisaillement :

$$\frac{Cs15}{100 \times D15}$$

Permet de comparer les diverses essences entre elles.

MODULE N° 05 :

CONNAISSANCE DES ESSAIS DES MATERIAUX

GUIDE DE TRAVAUX PRATIQUE

II.1. Travaux Pratique n° 1 : PRELEVEMENT D'EHANTILLONS

1. 1. Objectif visé : prélever sur le chantier, à la carrière ou dans situ, des quantités réduites de matériaux pour les essais, mais qui doivent représentent réellement les caractéristiques de l'ensemble du matériau dans lequel on fait le prélèvement.

1. 2. Durée du TP : 4 heures ;

1. 3. Matériel par équipe :

a) Equipement :
- échantillonneur de sable ;
- appareil de prélèvement ;
- carottier pour terres ;
- bacs métalliques de prélèvement ;

b) Matière d'œuvre :
- sables ;
- granulats ;
- sols in situ ;

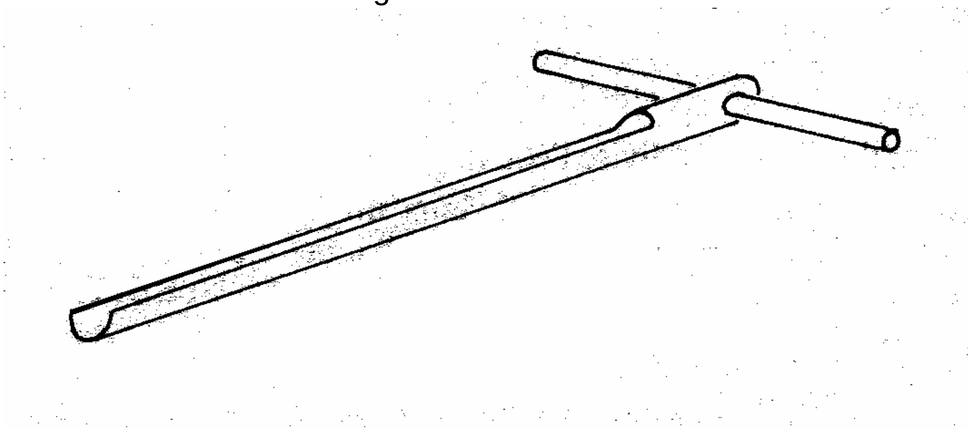
1. 4. Description du TP :

- Les essais que l'on fait en laboratoire portent nécessairement sur des quantités réduites des matériaux, qui s'appellent «échantillons», mais qui doivent être représentatif pour toute la quantité de matériau qui on veut l'employer.
- Ce prélèvement d'échantillons se fait en deux temps :
  a) prélever sur le chantier, à la carrière ou in situ d'une quantité de matériaux nettement plus grande que celle qui serra utilisée pour l'essai proprement dit, quantité qui sera emportée au laboratoire ;
  b) Au laboratoire, prélever dans la quantité reçue la fraction qui correspond à l'essai à faire (par exemple : 5 kg de gravillon pour une analyse granulométrique, 120 g de sable pour un essai d'équivalent de sable, etc.)
- Chacun de ces deux échantillonnages doit donner un prélèvement aussi représentatif que possible de l'ensemble, et dans ce point de vue, le premier est beaucoup plus embarrassant que le second.

1. 5. Déroulement du TP :

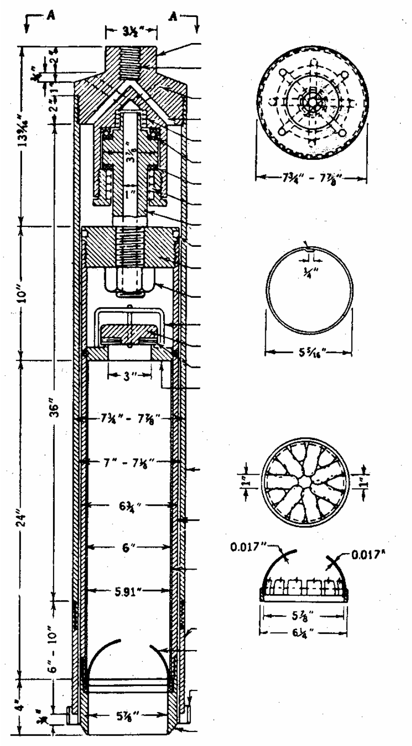
a) Prélèvement « in situ » des échantillons

- **Tas de sable –** d'habitude un tas de sable n'est pas homogène, et alors on en prendra de préférence une partie au bas du tas, une partie en haut et 3 parties à l'intérieur du tas, à l'aide d'un appareil comme sur la figure suivante :



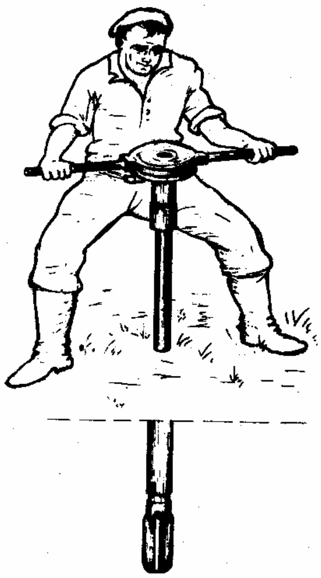
Pour faire le prélèvement, après l'enfoncement d'appareil dans le tas de sable on doit fait une rotation pour découpe une carotte et puis toutes ces diverses fractions seront mélangées avec soin dans le bac de prélèvement.

- **Tas de gravier –** le problème est analogue, mais l'hétérogénéité est moindre et l'emploi du tube à prélèvement est difficile. Alors dans ce cas on se conte de prenne une partie au bas, une partie en haut et une partie à mi-hauteur du tas.
- **Echantillon de terre –** pour faire ce prélèvement on doit utiliser dispositifs de carottage comme sur le schéma suivant :



- Carottier double à tube intérieur allongé et pivotant.

Ces dispositifs sont placés à la bute d'une tige pour pouvoir être actionnées en rotation comme sur la figure suivante :



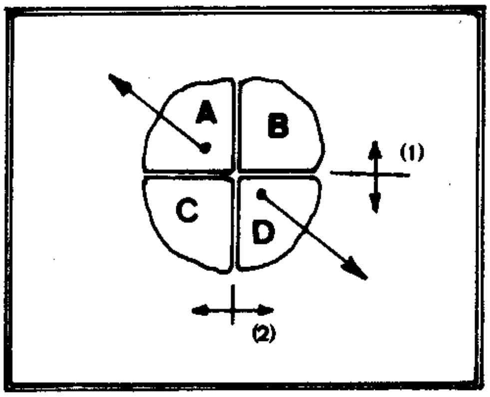
b) Echantillonnage en laboratoire

- ♦ Il est déjà établi que in situ on doit prélever une quantité plus grande (Q) de matériau et en laboratoire l'essai doit être fait sur une quantité plus faible (q).
- ♦ Pour séparer cette quantité (q) plus représentative pour (Q), on peut utiliser deux procédés assez satisfaisante :
  - par quartage,
  - à l'aide de l'échantillonneur,
- ♦ Première fois on doit préparer l'échantillon :
  - s'il s'agit d'un échantillon trop mouillé il faut sécher partiellement, mais à une température pas très élevée, et on doit respecter les suivantes règles :
    - ➢ Ne pas sécher à l'alcool,
    - ➢ Le mieux est le séchage à l'air, mais c'est long ;
    - ➢ S'il faut chauffer, il est nécessaire un thermostat pour ne pas dépasser 60°C pour argile et 100°C pour un corps non argileux ;
  - s'il s'agit d'un échantillon trop sec, il conduira à une perte d'éléments fins et alors il faut l'humecter ;
  - il fait aussi briser les éventuelles mottes ou simili cailloux, mais avec attention pour ne pas briser les éléments qui les composent ;

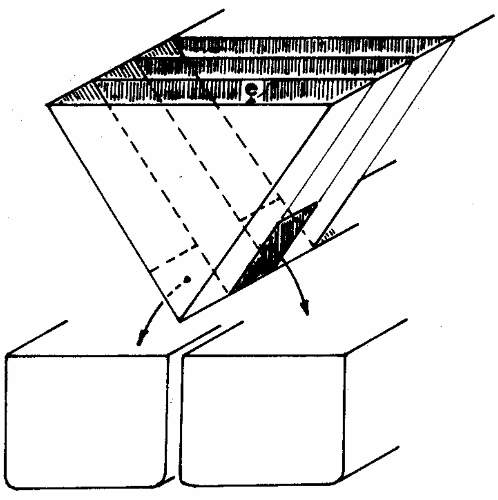
- ♦ **La méthode de séparation par quartage**

  Comme l'indique le nome, on doit diviser l'échantillon en quarts.

- Pour ça on doit placer l'échantillon bien homogénéisé dans un bac métallique à bords peu élevés et l'étaler sur une surface plane.
- A l'aide d'une truelle on partage d'abord en deux moitiés (1) et après ça en 4 quarts (2) sensiblement égaux.
- On doit éliminer les fractions A et D et réunir les fractions opposées B et C et on a ainsi la moitié de l'échantillon primitif.
- Si cette quantité (1/2) est encore trop importante, on doit suivi les même processus, d'où un échantillon représentatif égal au ¼ de la quantité primitive, et ainsi de suite.
- On peut illustrer cette méthode comme sur la figure suivante :



♦ **La méthode de séparation par l'emploi d'échantillonneur**
Dans ce cas on utilise un dispositif avec plusieurs cloisons transversales qui constituent d'entonnoirs, dirigés alternativement d'un côté à l'autre.
♦ Le matériau à étudier est versé sur l'échantillonneur à l'aide d'une pelle spéciale et recueillie dans deux petits bacs.
♦ Chaque moitié représentative de l'ensemble, peut être encore partage en deux, puis encore en deux, etc.
♦ On peut illustrer cette méthode avec la figure suivante :



II.2. Travaux Pratique n° 2 : MASSE VOLUMIQUE APPARENTE EN PLACE

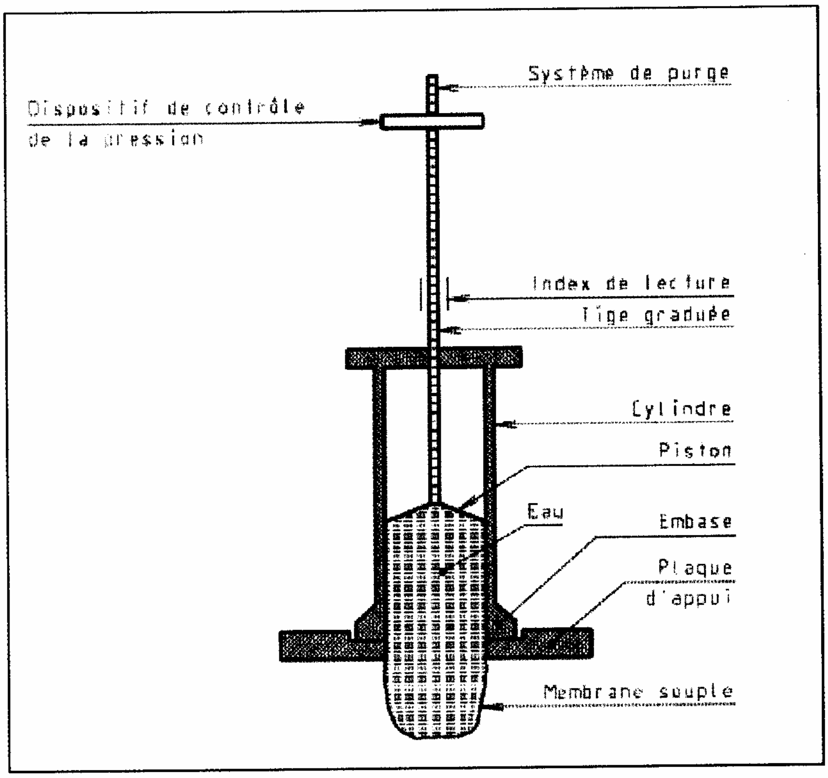
2. 1. Objectif visé : la détermination de la masse volumique apparente d'un sol en place, qui représente la masse de l'unité de volume constitué par la matière du corps et les vides qu'elle contient. Cet essai est réglementé par la norme française : NF P 94 – 061 – 2.

2. 2. Durée du TP : 4 heures ;

2. 3. Matériel nécessaire :

a) Equipement :

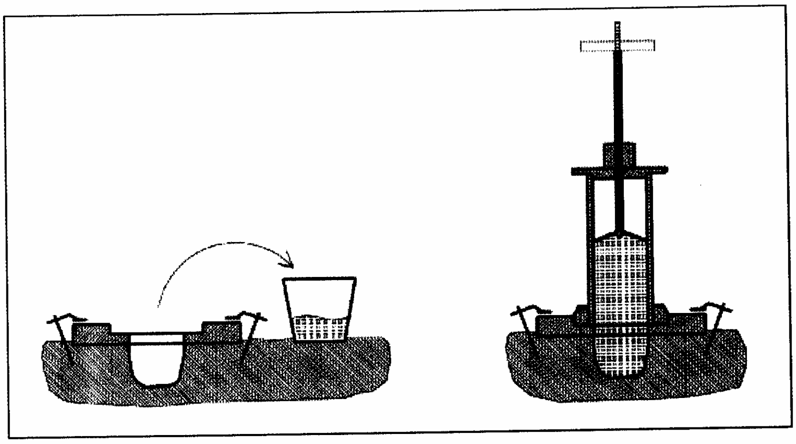
- un densitomètre à membrane comme sur la figure suivante :



- balance précise au 1/1000 de la masse pesée ;
- une plaque de base suffisamment rigide pour supporter sans déformation le poids de l'opérateur ; cette plaque est percée en son centre d'un orifice muni d'une collerette destinée à recevoir l'embase du corps d'appareil ;
- une plaque de transport – pour la protection de la membrane ;
- quatre piquets d'ancrage au moins (des valets) ;
- matériel de creusement (pelle, piochons, burin, couteau, marteau, etc.) ;
- matériel de prélèvement (sacs, main écope, feuille plastique, pinceau) ;

2. 4. Description du TP :

- L'essai consiste à creuser une cavité, à recueillir et peser la totalité du matériau extrait, puis à mesurer le volume de la cavité à l'aide d'un densitomètre à membrane.
- L'appareil est doté d'un piston qui sous l'action de l'opérateur, refoule un volume d'eau dans une membrane souple, étanche, qui épouse la forme de la cavité.
- Une tige graduée permet de lire directement le volume.
- Le principe de l'essai peut être illustré sur la figure suivante :



2. 5. Déroulement du TP :

a) Préparation de l'appareil – contient les suivantes opérations :

- fixer la membrane sur l'embase du cylindre ;
- remplir l'appareil d'eau et s'assurer qu'aucune bulle d'air ne subsiste dans le cylindre ;
- purger éventuellement selon le mode opératoire prescrit par le constructeur ;
- vérifier l'étanchéité du dispositif ;

b) Réalisation de l'essai – a trois étapes composantes :

<u>Mesure du volume initial</u> (V_0)

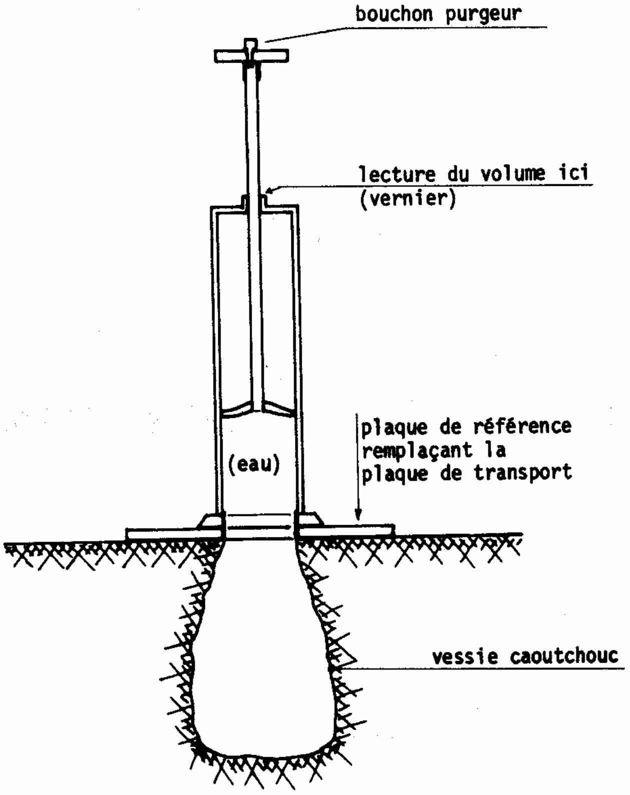
- préparer, par arasement une surface sensiblement horizontale au moins égale à celle de la plaque d'appui ;
- fixer la plaque d'appui avec les piquets d'ancrage (valets) ou en cas d'impossibilité, lester la plaque ;
- solidariser l'appareil à la plaque d'appui ;
- appuyer sur le piston jusqu'à obtenir de la pression désirée (supérieure ou égale à 5 kPa) ;
- mesurer le volume (V_0) sur le système de lecture ;

Creusement de la cavité et détermination de la masse humide (m_h)

- pratiquer l'excavation du trou à travers l'orifice de la plaque ;
- la profondeur doit être égale au diamètre de l'orifice à plus ou moins un demi rayon ;
- la forme de la cavité doit être régulière et on évitera les anfractuosités et les aspérités ;
- le volume minimal de la cavité est fonction du (**D_{max}**) matériau et il doit être tel que la masse du matériau extrait soit supérieure à 200 D_{max} et jamais inférieure à 1.500 g ;
- recueillir la totalité du matériau extrait de l'excavation, sans perte et le mettre dans un sac hermétique ;
- peser le matériau humide (m_h) et si nécessaire effectuer la mesure de sa teneur en eau ;

Détermination du volume total (V_t)

- fixer à nouveau l'appareil sur la plaque d'appui ;
- actionner le piston jusqu'à obtenir de la pression désirée (la pression de l'eau doit être égale ou supérieure à 5 kPa, mais ne doit pas déformer le matériau) ;
- mesurer le volume (V_t) sur le système de lecture ;
- on vérifiera visuellement, pendant toutes les opérations que la plaque ne s'est à aucun moment désolidarisé du sol ;



c) Expression des résultats

- La masse volumique du matériau humide est déterminée par la formule :

$$\rho_h = \frac{m_h}{V_t - V_0} \; ;$$ où on trouve :

ρ_h **–** la masse volumique du matériau humide en (g/cm^3) ;
m_h – la masse humide déterminée en (g) ;
V_0 – le volume initiale déterminé en (cm^3) ;
V_t - le volume totale déterminé en (cm^3) ;

- La masse volumique du matériau sec s'obtient par la formule suivante :

$$\rho_d = \frac{\rho_h}{1 + w} \; ;$$ où on trouve :

ρ_d **–** la masse volumique du matériau sec en (g/cm^3) ;
w – teneur en eau qui est déterminée avec la relation :

$$w = \frac{m_h - m_d}{m_d} \; ;$$ où on trouve :

m_d – la masse de matériau sec ;

d) Procès-verbal d'essai

- Le procès-verbal d'essai doit contenir les informations suivantes :
  - la référence au présent document – NF P 94-061-2 ;
  - l'identification de l'affaire ou du chantier ;
  - le nom de l'organisme qui a effectué l'essai ;
  - la date de l'essai ;
  - la situation de l'essai ;
  - la masse volumique du matériau ;
  - la masse volumique du matériau sec ;
  - éventuellement la teneur en eau ;

- A départ de ça on peut déterminer l'indice des vides (e), avec la relation :

$$e = \frac{\text{volume des vides}}{\text{volume des grains secs}} \; ;$$

II. 3. Travaux Pratique n° 3 : DETERMINATION DES LIMITES D'ATTERBERG

3. 1. Objectif visé : les limites d'Atterberg sont des paramètres géotechniques destinés à identifier un sol et à caractériser son état au moyen de son indice de consistance (**I_c**)**.** Celles deux limites sont :

- limite de liquidité à la coupelle (**W_L**) **;**
- limite de plasticité du rouleau (**W_P**) **;**

et elles s'applique aux sols dont les éléments passent à travers le tamis de dimension nominale d'ouverture de maille 400 μm. Cet essai est réglementé par la norme française : NF P 94-051.

3. 2. Durée du TP : 4 heures ;

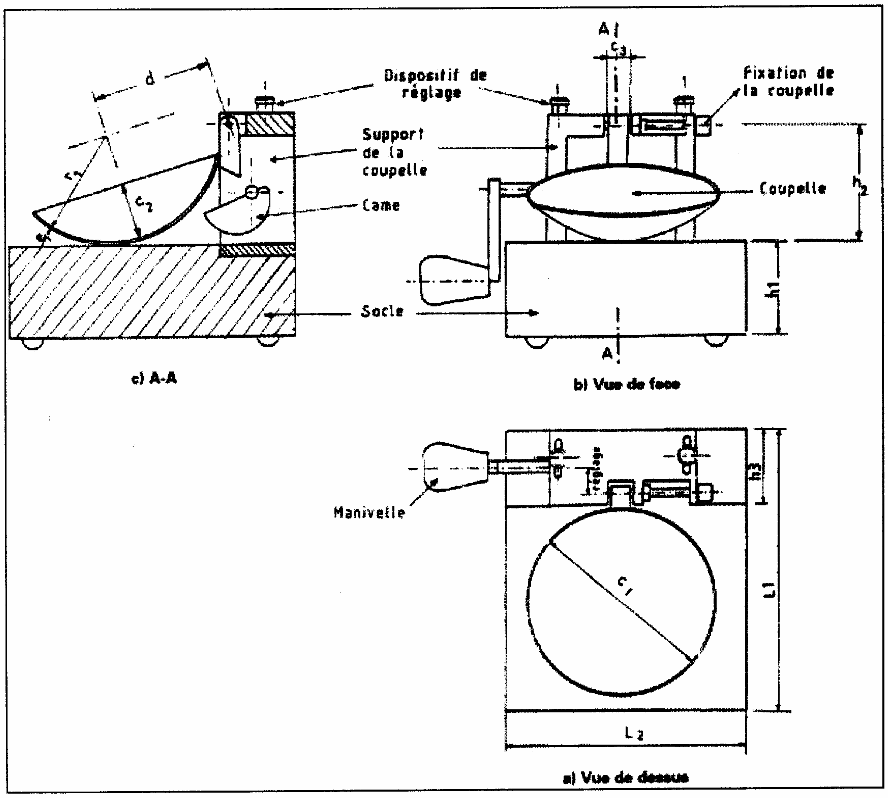
3. 3. Matériel nécessaire :

a) Pour la préparation du sol :

- un récipient d'au moins 2 litres ;
- un bac de dimensions minimales : 30 x 20 x 8 cm ;
- un tamis à maille carré de 400 μm d'ouverture ;

b) Pour la détermination de la limite de liquidité :

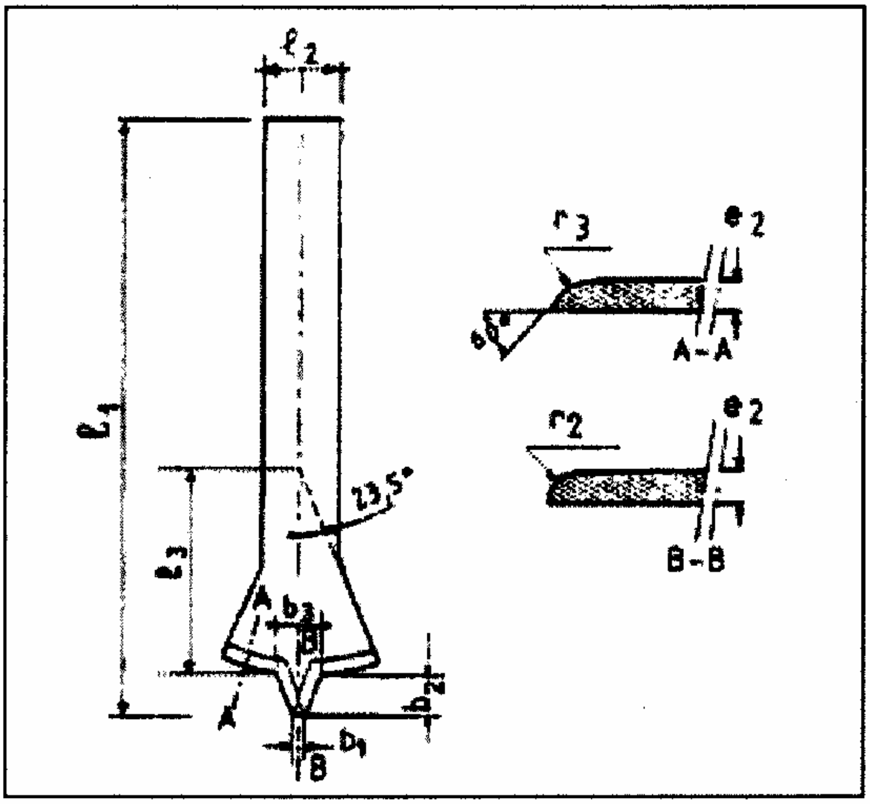
- un appareil de Casagrande ;



- Pour cet appareil les dimensions standardisées sont données dans le tableau suivant :

	Repère	Unité	Valeur	Tolérance
Coupelle				
Axe	c_3	mm	12,0	± 0,2
	d	mm	56,0	± 0,5
Masse		g	200	± 10
Diamètre intérieur de la section droite	c_1	mm	93,5	± 0,5
Rayon intérieur sphère	r_1	mm	54,0	± 0,5
Épaisseur coupelle	e_1	mm	2,0	± 0,1
Profondeur de coupelle	c_2	mm	27,0	± 0,1
Socle				
Longueur	L_1	mm	150	± 1
Largeur	L_2	mm	125	± 1
Hauteur	h_1	mm	50,0	± 0,5
Masse volumique		kg/m³	≥ 1 250 et ≤ 1 300	
Contrainte de rupture en compression		MPa	≥ 180 et ≤ 220	± 3
Support coupelle	h_2	mm	60,0	± 0,5
	h_3	mm	40	± 1
Cale de contrôle épaisseur		mm	10	0 / – 0,1

- d'un outil à rainurer de suivante forme :



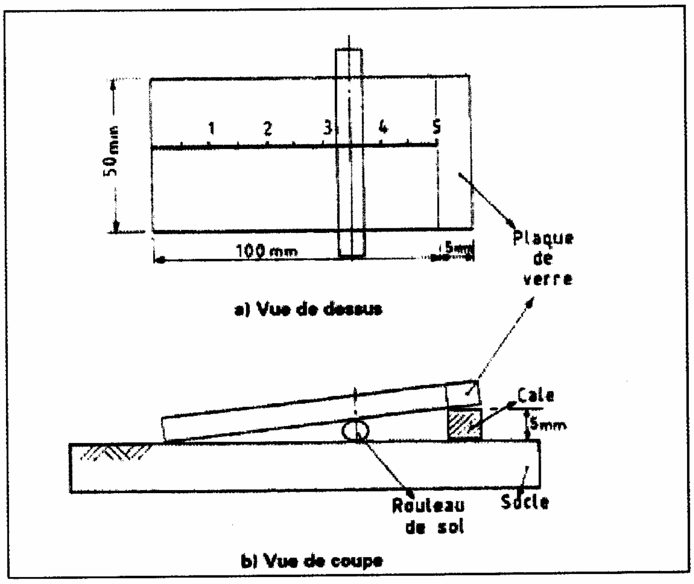
- les dimensions d'outil sont données dans le tableau suivant :

Repère	Unité	Valeur	Tolérance
l_1	mm	> 120	—
e_2	mm	1,6	± 0,2
l_2	mm	20,0	± 0,2
b_1	mm	2,0	+ 0,02 0
b_2	mm	8,0	0 − 0,02
b_3	mm	11,0	± 0,2
l_3	mm	50,0	± 0,2
r_2	mm	1,6	± 0,2
r_3	mm	3,2	± 0,2

- d'un cale de 10 mm épaisseur ;
- une étuve de dessiccation ;
- une balance ;
- des capsules ou boîtes de Pétri ;
- spatules ;
- truelles ;

c) Pour la limite de plasticité :

- une plaque lisse en marbre ou verre pour le malaxage et la confection des rouleaux de sol ;
- une plaque de verre de 5 cm de largeur et de 10,5 cm de longueur portant une graduation tous les 1 cm et une cale de 0,5 cm pour permettant d'apprécier le diamètre des rouleaux de sol de 3 ± 0,5 mm ; comme sur la figure suivante :

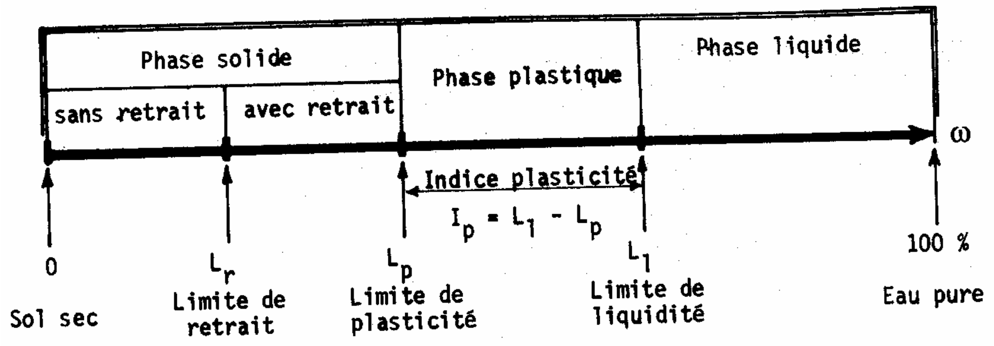


a) Vue de dessus

b) Vue de coupe

3. 4. Description du TP :

- Le comportement d'un sol varie dans des proportions importantes en fonction de sa teneur en eau :
  - Pour une valeur élevée de la teneur en eau le sol se comporte à peu prés comme un liquide ; s'est la boue, quand les forces de cohésion ne sont pas assez importantes pour maintenir les particules en place ;
  - Pour une teneur en eau diminue, vient la phase plastique, quand on peut modeler encore la terre sans qu'elle s'effrite, elle conserve sa forme ;
  - Puis on peut modeler la terre mais elle se fendrait au cours de travail et alors c'est la phase solide ;
  - On peut encore subdiviser la phase solide tandis que pour une teneur en eau relativement importante, la pellicule de l'eau qui enveloppe les grains repousses ces grains et augmente le volume apparente, de sorte que, si l'on sèche un tel sol, il y aura un retrait ;
  - Tandis que pour une teneur en eau encore plus faible l'eau ne repoussera plus les particules du sol, et le volume sec sera égal au volume humide et alors c'est sera la phase solide sans retrait ;
  - On peut figurer tous ces phases sur un schéma comme ça :



  - Les teneurs en eau qui correspondent au passage de l'un à l'autre de ces états sont respectivement :
    - La limite de liquidité – **W_L ;**
    - La limite de plasticité **– W_P ;**
    - La limite de retrait – **W_R ;**
  - On appelle l'indice de plasticité l'intervalle pendant lequel on peut travailler le sol et qui se détermine avec la relation :

$$I_P = W_L - W_P \ ;$$

- On peut aussi déterminer l'indice de consistance avec la relation suivante :

$$I_C = \frac{W_L - W}{I_P} \ ;$$

où (**W**) est la teneur en eau du sol dans son état naturel

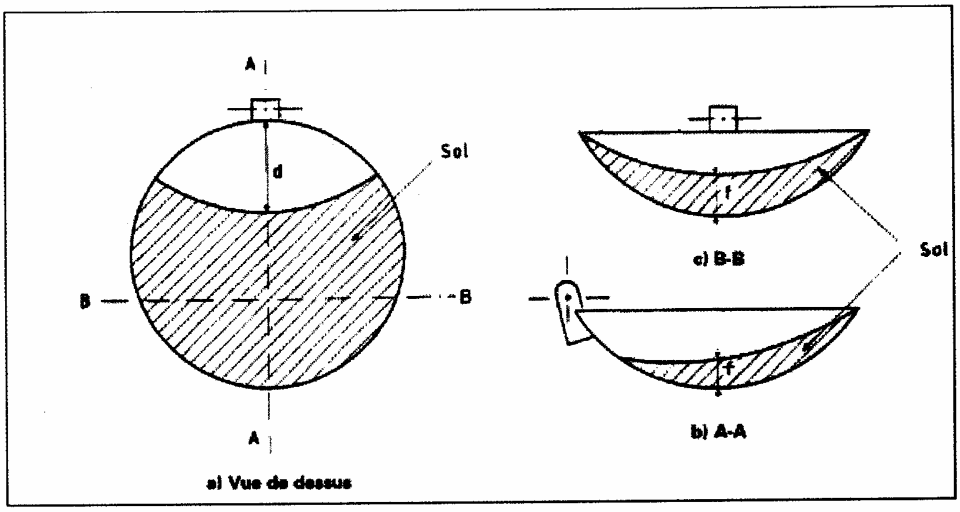
3. 5. Déroulement du TP :

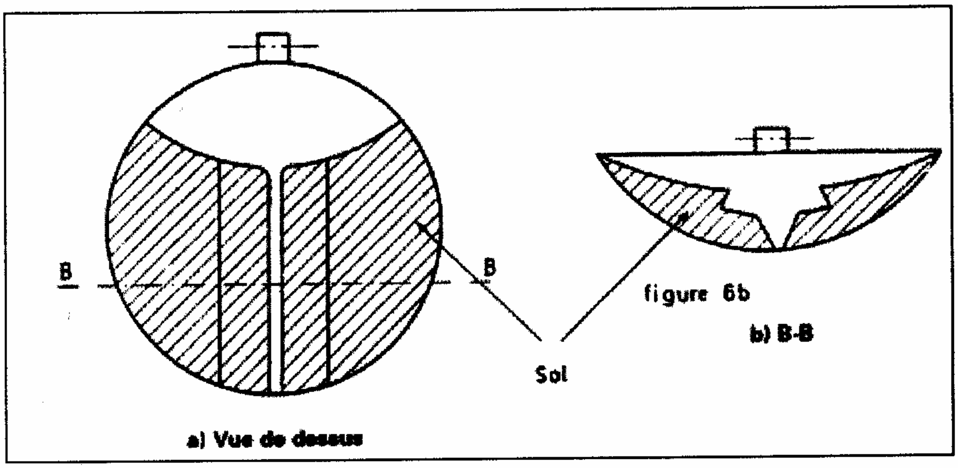
a) Préparation du sol :

- Les opérations décrites ci-dessous sont à réaliser successivement :
  - après échantillonnage du sol et homogénéisation par brasage, une masse de matériau (**m**) est mise à imbiber dans un récipient d'eau à la température ambiante, pendant au moins 24 heures ;
  - cette masse (**m**) exprimée en grammes, doit être supérieure à 200 fois la dimension des plus grosse éléments du sol appréciée visuellement et exprimée en mm ;
  - de même elle doit être telle que le tamisât sont recueillis au tamis de 400 µm donne au moins 200 g de particule solides ;
  - une fois imbibé, le matériau est tamisé par voie humide au tamis de 400 µm et l'eau de lavage avec le tamisât sont recueillis dans un bac ;
  - après un durée de décantation d'au moins 12 heures, sans aucun additif destiné à accélérer le dépôt ni sans utilisation d'un procédé quelconque de centrifugation, l'eau claire du bac est siphonnée sans entraîner de particules solides ;
  - l'eau excédentaire est évaporée à une température ne dépassant pas 50°

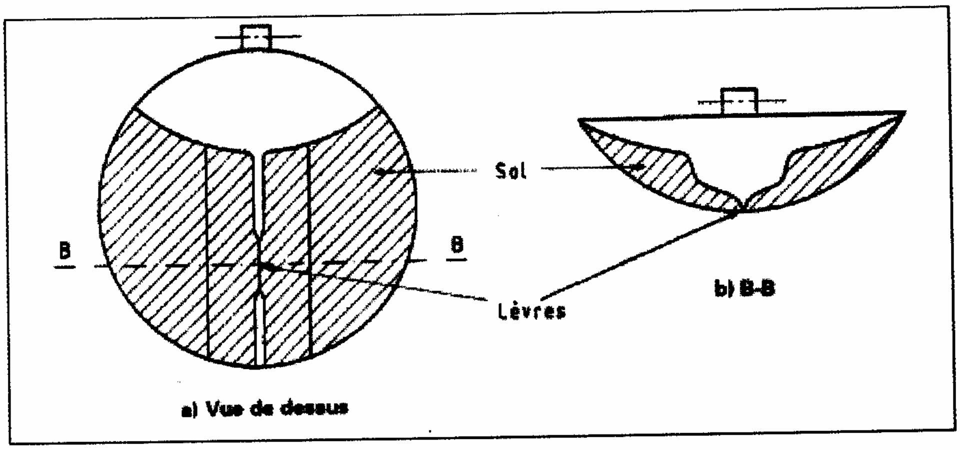
b) Détermination de la limite de liquidité

- Contrôle du fonctionnement de l'appareil :
  - avant de procéder à l'essai, il faut s'assurer que la largeur de la pointe de l'outil à rainurer est inférieure à 2,2 mm ;
  - la hauteur de chute de la coupelle est de 10mm (tolérance –0,1 ;+0,5mm)
  - le réglage se fait à l'aide d'une cale de contrôle de 10 mm épaisseur ;
- La totalité du tamisât est malaxée afin d'obtenir une pâte homogène et presque fluide ;
- Réalisation de l'essai consiste en :
  - répartir avec la spatule, dans la coupelle propre et sèche, une masse d'environ 70 g de pâte ;
  - cette pâte étalée en plusieurs couches fines afin d'éviter d'emprisonner des bulles d'air, présente en fin d'opération un aspect symétrique comme indique la figure suivante ;
  - la pâte recouvre le fond de la coupelle, sauf sur une partie d'environ 3 cm et son épaisseur (f) est au centre d'ordre de 15 à 20 mm ;
  - partager la pâte en deux, comme représente sur la figure suivante, au moyen de l'outil à rainurer en le tenant perpendiculairement à la surface de la coupelle et en présentent sa partie biseautée face à la direction du mouvement ;
  - fixer doucement la coupelle sur le support de l'appareil de Casagrande ;
  - actionner la came de façon à soumettre la coupelle à une série des chocs à la cadence de 2 coups par seconde ;





- il faut noter le nombre (N) de chocs nécessaires pour que les lèvres de la rainure se rejoignent sur une longueur d'environ 1 cm comme sur la figure :



- on doit mentionner que la fermeture de la rainure se produire par l'affaissement de la pâte dans sa masse et non par glissement sur la paroi de la coupelle ;

- la coupelle rugueuse a pour but d'éviter ce glissement et elle doit être employée lorsque le phénomène se produit (par exemple avec le pâte sableuse) ;
- si (N) est inférieure à 15, le processus est recommencé avec un matériau plus sec et homogénéisé à nouveau ;
- si (N) est supérieure à 35, l'opération est renouvelée sur un prélèvement de pâte auquel a été ajouté un peu d'eau distillée ou déminéralisée ;
- l'essai n'est poursuivi que lorsque (N) est compris entre 15 et 35 ;
- prélever dans la coupelle, à l'aide d'une spatule, environ 5 g de pâte de chaque côté des lèvres de la rainure et au voisinage de l'endroit où elles se sont refermées, afin d'en déterminer la teneur en eau ;
- le prélèvement est placé dans une capsule ou boîte de Pétri de masse connue et pesé immédiatement avant d'être introduit dans l'étuve pour dessiccation ;
- l'opération complète est effectuée au moins quatre fois sur la même pâte, mais avec une teneur en eau différente à chaque fois ;
- les nombres de chocs de la série d'essais doivent encadrer 25 à l'écart entre deux valeurs consécutives doit être inférieur ou égal à 10 ;

c) Détermination de la limite de plasticité :

♦ Et dans ce cas on part d'une pâte préparée comme au point (a), et après :

- on forme une boulette ;
- rouler la boulette sur la plaque lisse, à la main ou éventuellement à l'aide d'une plaquette, de façon à obtenir un rouleau qui est aminci progressivement jusqu'à ce qui il atteigne 3 mm de diamètre ;
- la cadence du mouvement de la main doit être régulière dans ce temps ;
- l'amincissement du rouleau se fait de manière continue et sans effectuer de coupure dans le sens de sa longueur ;
- le rouleau au moment où il atteint un diamètre de 3,00 ± 0,5 mm doit avoir environ 10 cm de longueur et ne doit pas être creux ;
- la limite de plasticité est obtenue lorsque, simultanément, le rouleau se fissure et que son diamètre atteint 3,00 ± 0,5 mm ;
- si aucune fissure n'apparaît, le rouleau est réintégré à la boulette ;
- la pâte est malaxée tout en étant séchée légèrement, éventuellement sous un flux d'air chaud à une température inférieure à 50°C ;
- reformer un nouveau rouleau et on recommence le cycle d'opérations ;
- prélever une fois les fissures apparues, la partie centrale du rouleau et le placer dans une capsule ou dans une boîte de Pétri, de masse connue, le peser immédiatement et l'introduire dans l'étuve, afin de déterminer sa teneur en eau ;
- effectuer un deuxième essai sur une nouvelle boulette ;

d) Expression des résultats :

♦ **Limite de liquidité (W_L) :**

- la limite de liquidité est la teneur en eau du matériau qui correspond conventionnellement à une fermeture sur 1 cm des lèvres de la rainure après 25 de chocs ;
- elle est calculée à partir de l'équation de la droite moyenne ajustée sur les couples de valeurs expérimentales ;
- cette droite moyenne ne peut être déterminée sans un minimum de quatre points ;
- la relation n'est acceptable que si l'écart de teneur en eau entre la valeur mesurée et la valeur calculée pour le même nombre de coups n'excède pas 3% et s'il n'est pas ainsi on doit refaire une mesure ;
- la limite (**W_L)** est obtenue pour une valeur (N) égale à 25 et elle est exprimée en pourcentage et arrondie au nombre entier le pus proche et l'intervalle d'arrondissage est de 1 ;

♦ **Limite de plasticité (W_P) :**

- la limite de plasticité (**W_P**) est la teneur en eau conventionnelle d'un rouleau de sol qui se fissure au moment où son diamètre atteint 3,00 ± 0,5 mm ;
- W_P est la moyenne arithmétique des teneurs en eau obtenues à partie de deux essais ;
- la valeur de la limite de plasticité est exprimée en pourcentage et l'intervalle d'arrondissage est 1 ;
- si la valeur s'écarte de plus 2% de la valeur moyenne, un nouvelle essai est à effectuer ;

♦ **Indice de plasticité (I_P) :**

- est la différence entre les valeurs des limites de liquidité et de plasticité ;

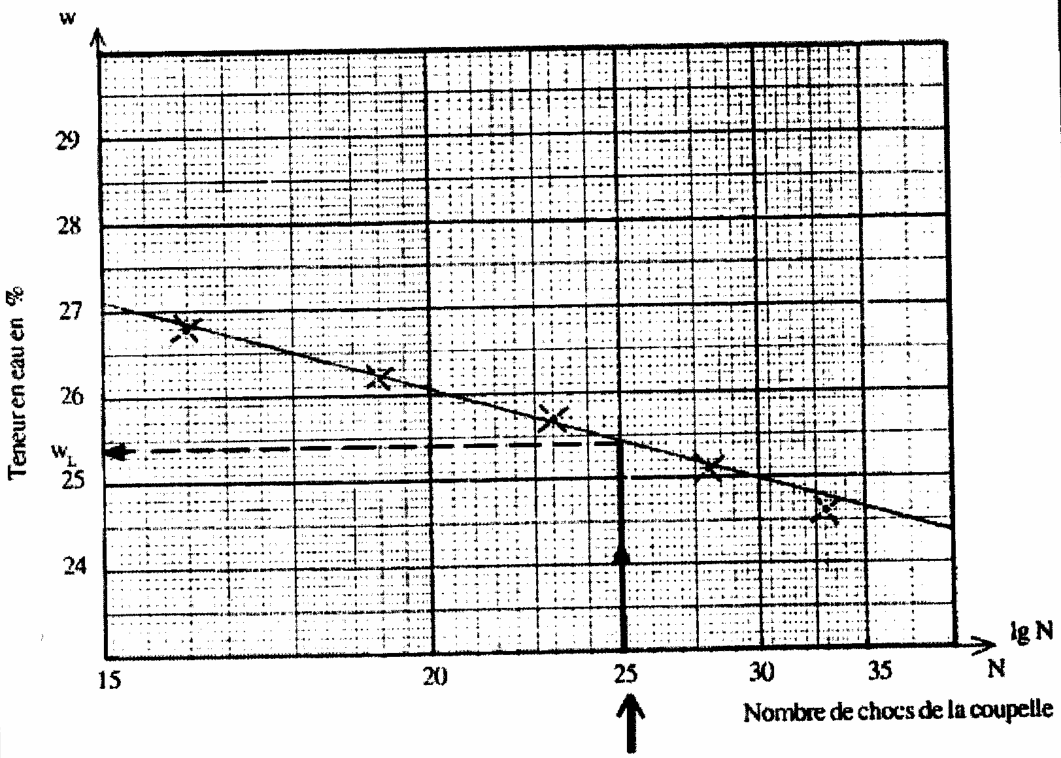
♦ **Procès-verbal d'essai :**

- le procès-verbal d'essai contient les informations minimales suivantes :
  - la référence à la norme NF P 94-051 ;
  - la provenance de l'échantillon : site, sondage, profondeur, date, etc.
  - le nom de la firme qui a réalisé l'essai, le numéro de dossier et la date d'essai ;
  - la limite de liquidité, la limite de plasticité et l'indice de plasticité ;
- les couples de la valeur teneur en eau – nombre de chocs de la coupelle, ne sont pas fournis que sur demande ;
- un exemple de procès-verbal d'essai est donné sur la page suivante :

Firme :	**PROCÈS-VERBAL D'ESSAI** **DÉTERMINATION DES LIMITES D'ATTERBERG** Conformément à la norme NF P 94-051	
Site :	Méthode de prélèvement :	Dossier n° : ....
		Sondage : ....
	Date :	Profondeur : ....

Limite de liquidité à la coupelle de Casagrande

Mesures n°	1	2	3	4	5	6
Nombre de coups N						
Teneur en eau (%)						



Teneur en eau de plasticité (%)	w = ... w = ...	w = ...	w = ... w = ...	w_p = ...

Limite de liquidité : w_L = ... %	Indice de plasticité I_p = ...
Limite de plasticité : w_p = ... %	
Teneur en eau du sol : w .... %	Indice de consistance I_c = ...

II.4. Travaux Pratique n° 4 : LA LIMITE DE RETRAIT

4. 1. Objectif visé : la détermination de la limite de retrait (**W_R**) qui est la teneur en eau pondérale conventionnelle de dessiccation d'un terrain remanié, au-dessous de laquelle le volume de l'échantillon est supposé ne plus varier. Cet essai est réglementé par la norme française : XP P 94-060-1.

4. 2. Durée du TP : 16 heures ;

4. 3. Matériel par équipe :

a) Equipement :

- des bacs de décantation ;
- une balance de portées maximale et minimale compatibles avec les masses à peser et telles que les pesés soient effectuées avec une incertitude de 1/1000 de la valeur de la masse de matériau pesée ;
- une étuve de dessiccation : enceinte thermique ou étuve de dessiccation à température réglable à 105°C et 50°C ; de classe d'exactitude C, pour ce qui concerne uniquement la température ;
- des coupelles d'au moins 50 cm^3 de volume intérieure ;
- des spatules et couteau à bord rectiligne ;
- une plaque lisse en marbre ou en matériau d'état de surface équivalente ;
- de l'eau déminéralisée ;
- du mercure de masse volumique connue ;
- un récipient (capsule, bêcher ou équivalente) rempli de mercure dans lequel est immerge la prise d'essai ;
- un bac pour recueillir le mercure excédentaire ;
- un aimant ;
- un dispositif pour saisir la prise d'essai après son passage à l'étuve ;
- des tamis dont un tamis à maille carré de 400 μm d'ouverture nominale ;
- un dessiccateur ;
- **Note :** la manipulation du mercure doit se faire selon les règles sanitaires et de protection de l'environnement en vigueur.

4. 4. Description du TP :

♦ A partir du passant au tamis de 400 μm d'un matériau, est constituée une pâte homogène à une teneur en eau voisine de sa limite de liquidité (**W_L**) ;
♦ L'essai consiste à déterminer sur une prise d'essai de volume connu (**V_h**) :
  - sa masse initiale (**m_h**) ;
  - sa masse (**m_d**) et son volume (**V_d**) après dessiccation complète par étuvage ;

- La perte de volume de la prise d'essai entre son état saturé et son état sec est par convention égale au volume d'eau de masse volumique (**p_w**) perdu jusqu'à la limite de retrait.
- Dans ce cas la teneur en eau correspondant à la limite de retrait est :

$$W_R = \frac{m_h - p_w\,(V_h - V_d)}{m_d} \;;$$

- Il faut mentionner que le volume (**V_d**) de la prise d'essai à l'état sec est déterminé par immersion dans un bac contenant du mercure de masse volumique connue.

4. 5. Déroulement du TP :

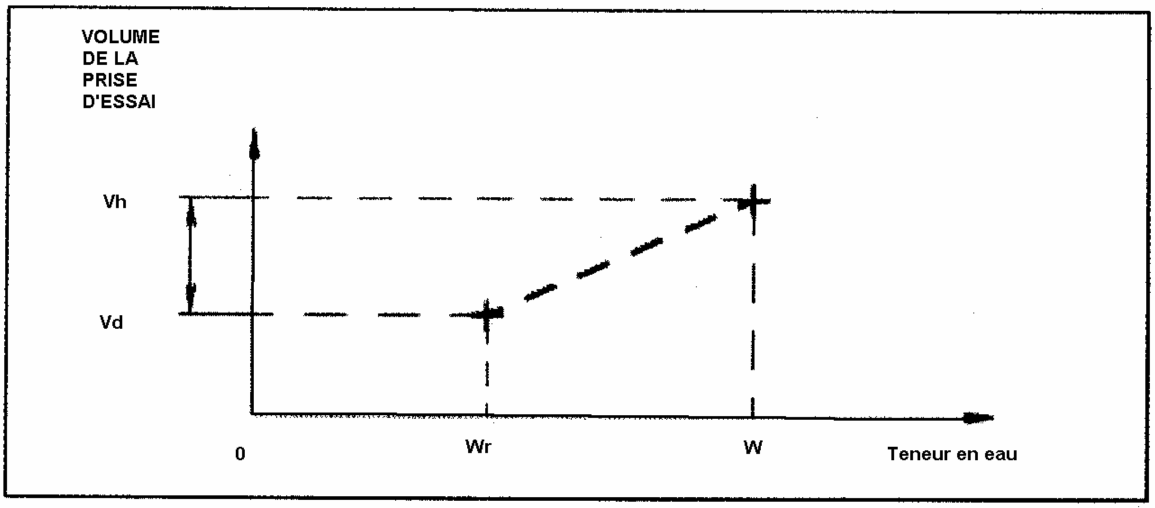
a) Préparation de l'échantillon :

- Les opérations décrites ci-dessous sont à réaliser successivement :
  - après échantillonnage du sol et homogénéisation par brasage, une masse de matériau (**m**) est mise à imbiber dans un récipient d'eau à la température ambiante, pendant au moins 24 heures ;
  - cette masse (**m**) exprimée en grammes, doit être supérieure à 200 fois la dimension des plus grosse éléments du sol appréciée visuellement et exprimée en mm ;
  - de même elle doit être telle que le tamisât sont recueillis au tamis de 400 µm donne au moins 200 g de particule solides ;
  - une fois imbibé, le matériau est tamisé par voie humide au tamis de 400 µm et l'eau de lavage avec le tamisât sont recueillis dans un bac ;
  - après un durée de décantation d'au moins 12 heures, sans aucun additif destiné à accélérer le dépôt ni sans utilisation d'un procédé quelconque de centrifugation, l'eau claire du bac est siphonnée sans entraîner de particules solides ;
  - l'eau excédentaire est évaporée à une température ne dépassant pas 50°

b) Préparation de la prise d'essai :

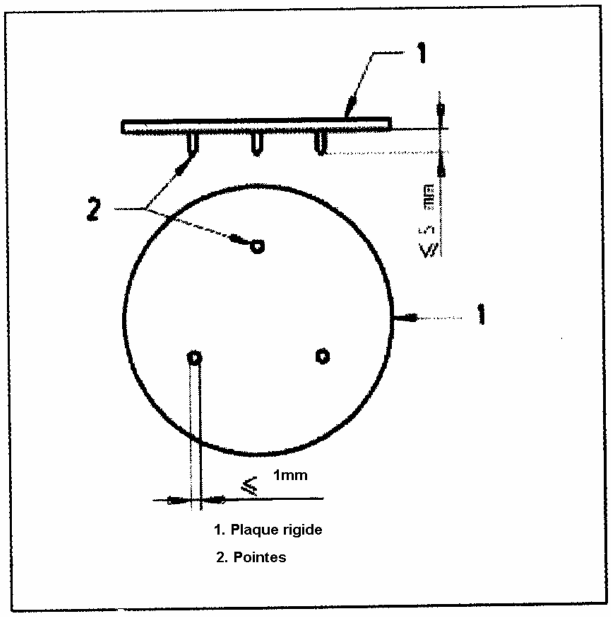
- La totalité du tamisât est malaxée afin d'obtenir une pâte homogène et presque fluide ;
- Peser la coupelle de volume connu destinée à recueillir la pâte après l'avoir enduite très légèrement si nécessaire d'un produit évitant toute adhérence de la pâte à la coupelle.
- Remplir la coupelle de pâte au moyen d'une spatule ;
- Cette pâte est étalée en plusieurs couches afin d'éviter d'emprisonner des bulles d'air ;
- Araser la coupelle ;

- L'opération est renouvelée de façon à obtenir au moins trois prises d'essai qui peuvent être traitée simultanément si la quantité de matériau est suffisante ;



c) Réalisation de l'essai et mesures :

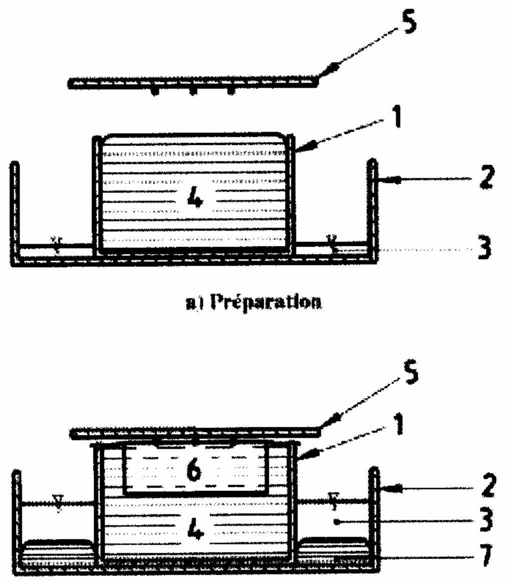
- Déterminer par pesage la masse de pâte emplissant la coupelle ($\mathbf{m_h}$) ;
- Laisser dessécher la prise d'essai à l'air ambiant pendant au moins 12 heures avent de placer à l'étuve la coupelle et son contenu jusqu'à dessiccation complète, pour déterminer la teneur en eau conformément à norme : NF P 94-050.
- Une fois sèches et pesées, les prises d'essais sont retirées avec une extrême précaution des coupelles, parce que toute prise d'essai qui se désagrège est éliminé, et pour cette opération on utilise une plaque rigide



1. Plaque rigide
2. Pointes

♦ Préparation :

- remplir une capsule (1) de mercure (4) elle même placée au préalable dans un bac (2) contenant de l'eau (3), et araser le ménisque en plaçant la plaque (5) sur le récipient (1), avec les pointes pénétrant dans le mercure, comme est illustrée sur la figure suivante :



a) Préparation

b) Immersion de la prise d'essai dans le mercure

Légende

1 Récipient rempli de mercure

2 Bac

3 Eau

4 Mercure

5 Plaque rigide (voir figure 2) avec pointes

6 Prise d'essai

7 Mercure chassé du conteneur 1 par l'introduction de 6

- le mercure en excédent est recueilli dans le bac (2) ;

♦ Mesures :

- placer la capsule (1) de mercure dans un bac ne contenant que de l'eau ;
- fixer la prise d'essai (6) sur les pointes de la plaque (5) et enfoncer la prise d'essai dans le mercure jusqu'à ce que la plaque arase le ménisque ;
- peser le mercure ($\mathbf{m_{Hg}}$) expulsé (7) lors de l'introduction de la prise d'essai

d) Expression des résultats

♦ Pour chaque prise d'essai, calculer la teneur en eau qui correspond à la limite de retrait, avec la formule suivante :

$$W_R = \frac{m_h - (V_h - V_d) \times p_w}{m_d} - 1 \; ;$$ où on trouve :

$$V_d = \frac{m_{Hg}}{p_{Hg}} \; ;$$

p_w – est la masse volumique de l'eau à la température d'essai ;
p_{Hg} – est la masse volumique du mercure à la température d'essai ;

- Dans ce cas, la limite de retrait (**W_R**) est la moyenne arithmétique des teneurs en eau déduites des trois prises d'essai et on peut utiliser un feuille de calcul :

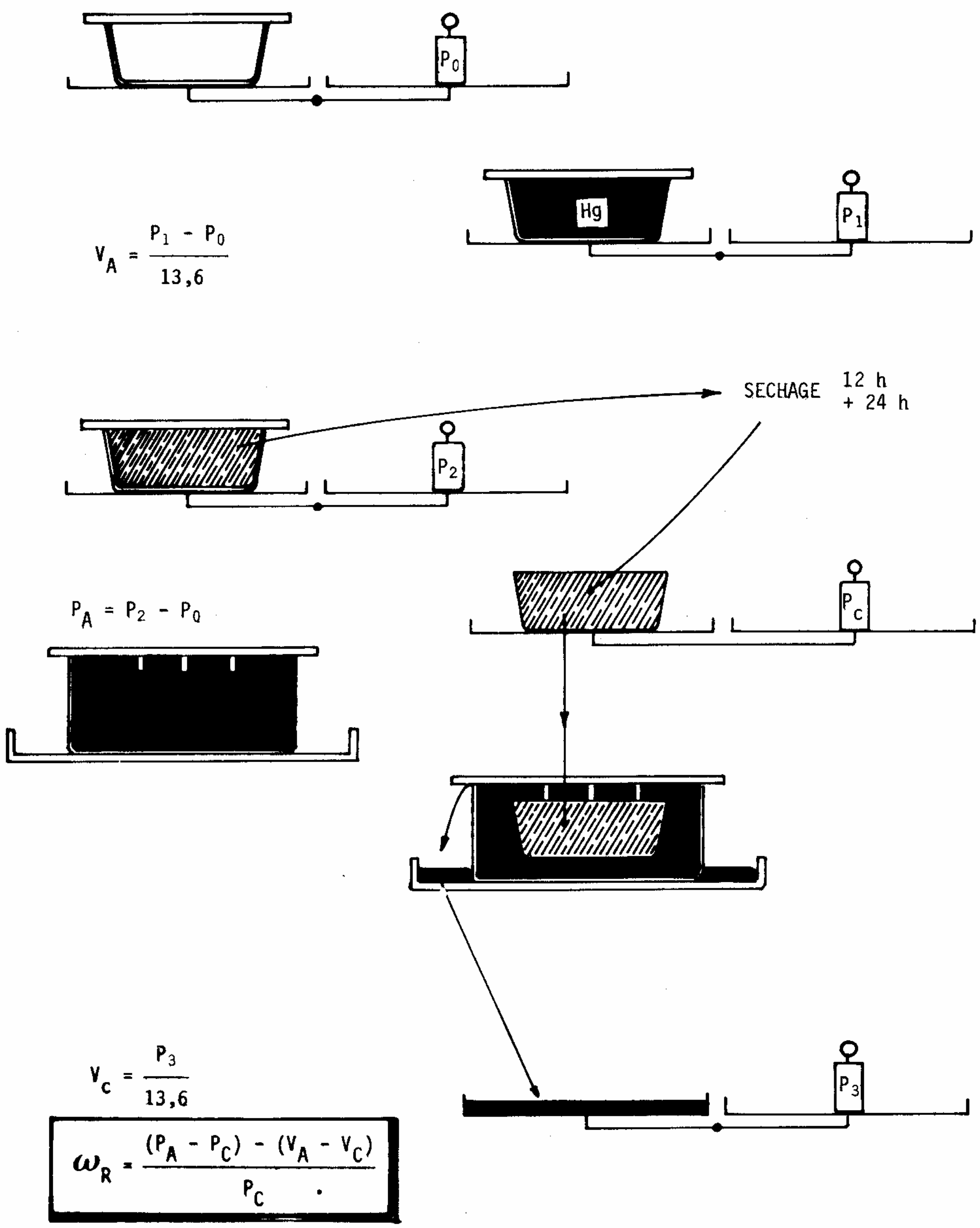
	Prise n° 1	Prise n° 2	Prise n° 3
Poids total humide .... P_1 :	....	....	....
Tare .... P_0 :	....	....	....
$P_A = P_1 - P_0$:	....	....	....
Poids total sec .... P_C :	....	....	....
$P_A - P_C$:	....	....	....
$V_A = \frac{P_A - P_C}{13{,}6} =$	....	....	....
Poids du mercure sorti .... P_2 :	(..........)	(..........)	(..........)
$V_C = \frac{P_2}{13{,}6}$:	....	....	....
$V_A - V_C$:	....	....	....
$(P_A - P_C) - (V_A - V_C)$:	....	....	....
$\omega_R =$	....	....	....
Moyenne		....	

e) **Procès-verbal d'essai :**

- Le procès-verbal d'essai de détermination de la limite de retrait doit faire apparaître les suivantes informations :
  - la référence au présent document, la norme : XP P 94-060-1 ;
  - la provenance du matériau : site, sondage, profondeur, date et mode de prélèvement ;
  - le nom de l'organisme qui a réalise l'essai, le numéro de dossier et la date d'essai ;
  - la valeur de la teneur en eau pondérale (**W_R**) en pourcentage correspondant à la limite de retrait ;

  les observation liées à la réalisation de l'essai ainsi que les incidents et détails opératoires non prévus dans le présent document et susceptibles d'avoir une influence sur le résultat .

♦ On peut illustrer le principe de cet essai comme sur la figure suivante :

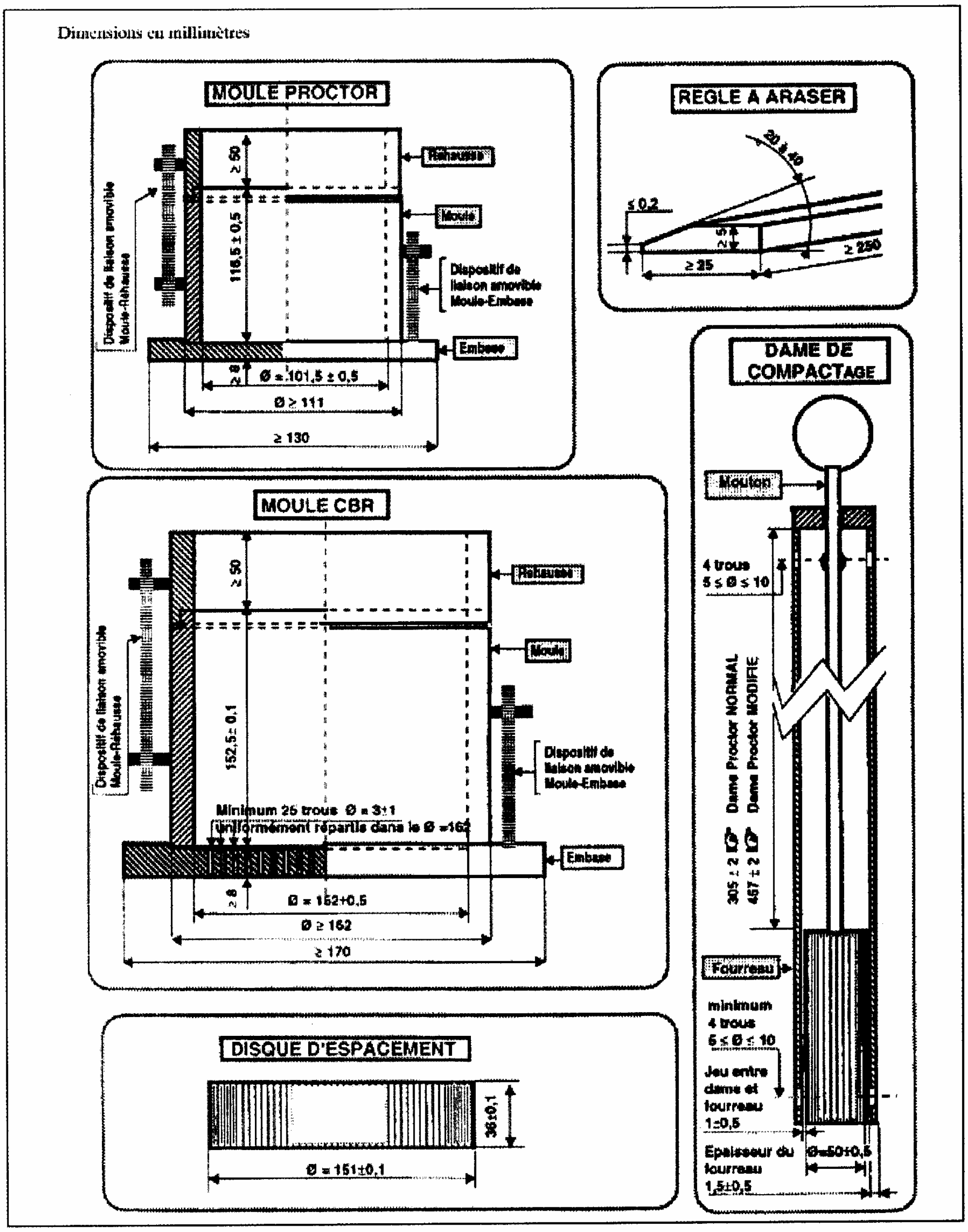


II.5. Travaux Pratique n° 5 : <u>ESSAI PROCTOR</u>

5. 1. Objectif visé : L'essai Proctor a pour but de déterminer la teneur en eau optimale, qui conduit à la force portante maximale, ce pour un sol donné et des conditions de compactages données. Cet essai est réglementé par la norme : NF P 94-093/ 1997

5. 2. Durée du TP : 4 heures ;

5. 3. Matériel :



- L'appareillage spécifique comporte :
  - un socle de compactage constitué d'un bloc de béton présentant une surface plane horizontale d'au moins 30 X 30 cm et d'un épaisseur d'au moins 30cm ;
  - Deux modèles des moules : Proctor et CBR ;
  - Deux modèles de dames de compactage manuelles : Proctor normal et Proctor modifié ;
  - une règle à araser constitué par une lame en acier ;
  - les machines à compacter mécanisée (parfois, si elles répondent aux mêmes conditions d'essai) ;

- Appareillage d'usage courant :
  - tamis d'ouverture de mailles carrées de dimensions nominales 5 mm et 20 mm ;
  - balances dont les portées maximale et minimale sont compatibles avec les masses à peser et telles que les pesées soient effectuées avec une incertitude de 1/1000 de la valeur mesurée ;
  - une enceinte thermique ou un appareil de séchage pour déterminer la teneur en eau des matériaux selon une méthode normalisée ;
  - des récipients (ou des sacs) hermétiques permettant de conserver la teneur en eau des échantillons ;
  - un pulvérisateur à l'eau ;
  - éventuellement un malaxeur- désagrégation mécanique dont le volume de la cuve est d'au moins 10 dm^3 ;
  - un dispositif permettant d'extraire l'éprouvette hors du corps du moule ;

5. 4. Description du TP :

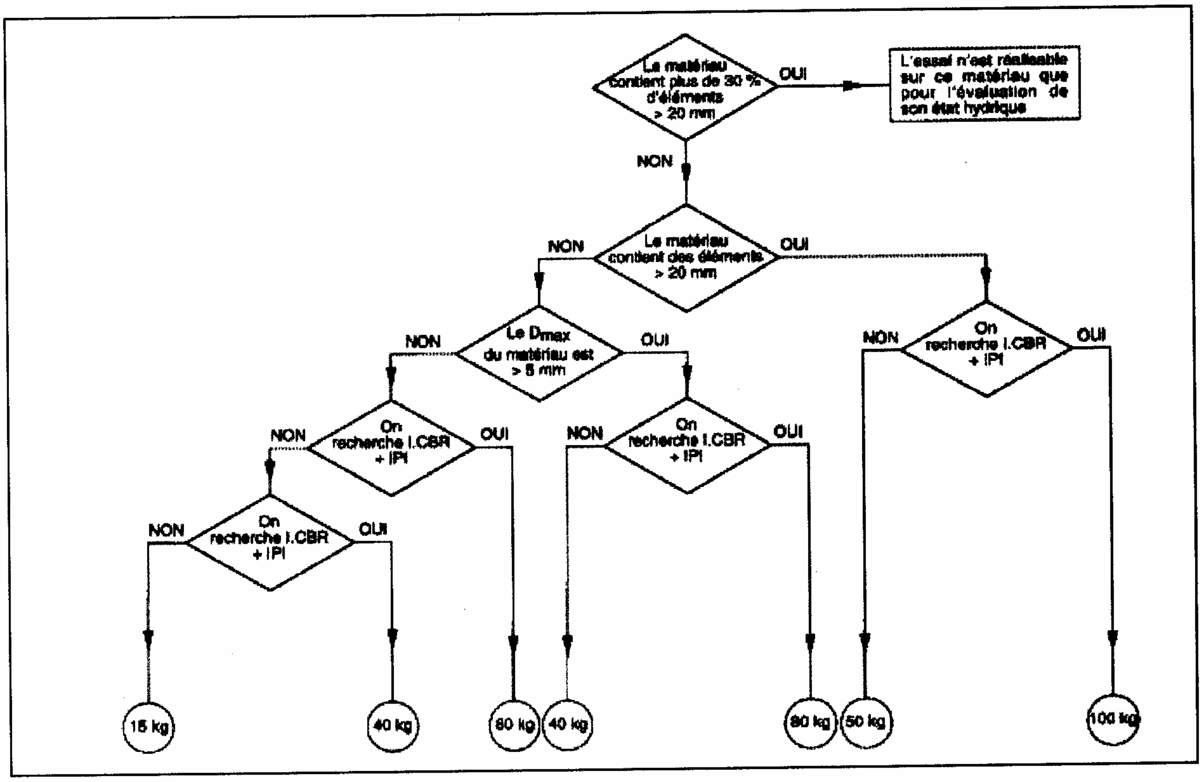
- Cet essai permet de déterminer les caractéristiques de compactage d'un matériau, qui sont la teneur en eau optimale et la masse volumique sèche maximale ;
- Selon l'énergie de compactage appliquée à l'éprouvette, on distingue l'essai Proctor normale et l'essai Proctor modifié, qui conduisent à des couples de valeurs différents ;
- Cet essai s'applique aux matériaux lesquels la dimension des plus gros éléments (D_{MAX}) ne dépasse 20 mm, qu'ils soient naturels traités avec le chaux et/ou des liants hydrauliques ;
- Les caractéristiques de compactage Proctor sont des paramètres très utilisés pour identifier les matériaux et pour définir les spécifications de compactage qui leur sont applicables lorsqu'ils sont utilisés dans la construction des remblais et des couches de forme.
- Ces caractéristiques peuvent perdre tout ou partie de leur signification lorsqu'elles sont déterminées sur des matériaux friables tels que : craies, marnes, schistes, grès et calcaires tendres, etc. en raison de la modification granulométrique inhérente au processus de compactage propre à l'essai ;
- Dans ce cas l'essai nécessite une interprétation spécifique ;

- ♦ Le principe de ces essais consiste à humidifier un matériau à plusieurs teneur en eau et au compacter, pour chacune des teneurs en eau, selon un procédé et une énergie conventionnelle ;
- ♦ Pour chacune des valeurs de teneur en eau considérées, on détermine la masse volumique sèche du matériau et on trace la courbe des variations de cette masse volumique en fonction de la teneur en eau ;
- ♦ D’une manière générale cette courbe, appelé courbe Proctor, présente une valeur maximale de la masse volumique du matériau sec qui est obtenu pour une valeur particulière de la teneur en eau ;
- ♦ Ce sont ces deux valeurs qui sont appelées caractéristiques optimales de compactage Proctor normale ou modifié, suivant l’essai réalisé.

5. 5. Déroulement du TP :

a) Préparation des échantillons soumis à l’essai – prise d’échantillon

- la masse totale de matériau nécessaire à l’exécution d’un essai doit permettre de faire un prélèvement différent pour chaque point de la courbe Proctor, car il n’est pas autorisé de réutiliser le même matériau pour la détermination de plusieurs points de la courbe Proctor ;
- elle varie entre 15 et 100 kg suivant la granulométrie du matériau et suivant que l’on cherche une détermination concomitante de ses caractéristiques de compactage, de son indice CBR après immersion et/ou de son Indice Portant Immédiat ;
- le diagramme suivant précise ces masses et il s’agit de quantités minimales nécessaires à le déterminer de la courbe Proctor en 5 points :



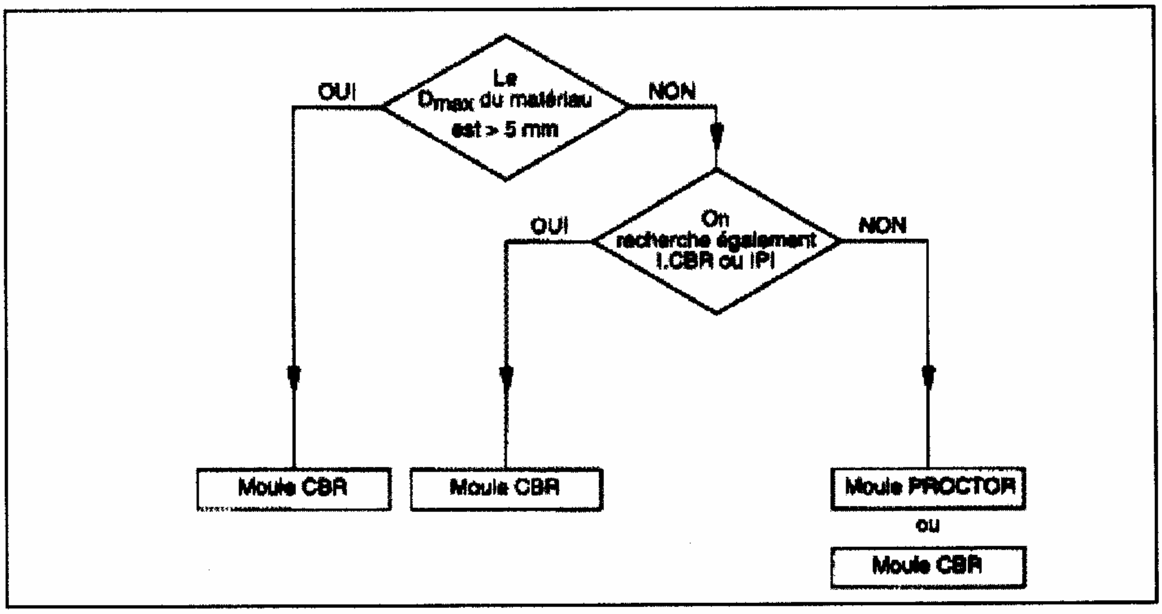
b) Préparation des éprouvettes :

- la totalité du matériau prélevé est, si nécessaire, séchée à l'air ou dans une étuve réglée à 50°C maximum jusqu'à un état hydrique jugé suffisamment sec pour commencer l'essai ;
- après séchage, le matériau est tamisé à 20 mm et seul le tamisât est conservé pour l'exécution de l'essai ;
- le matériau est homogénéisé et divisé par appréciation visuelle en au moins cinq parts égales ;
- les parts sont humidifies à une teneur en eau telle que les teneurs en eau des trois parts au moins et quatre au plus soient réparties entre :

  0,8 wOPN (ou OPM) et 1,2 wOPN (ou OPM) ;
- après humidification, chaque part est conservée en boîtes ou sacs hermétiques durant un temps en fonction de l'argilosité du matériau pour parfaire la diffusion de l'eau ;
- c'est à partir de chacun de ces parts que seront confectionnées les éprouvettes destinées à la détermination des points de la courbe Proctor ;
- l'humidification de chacun de des parts du matériau constitue la phase plus délicate de l'essai ;

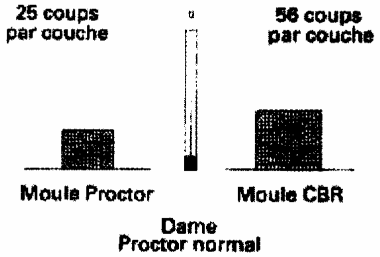
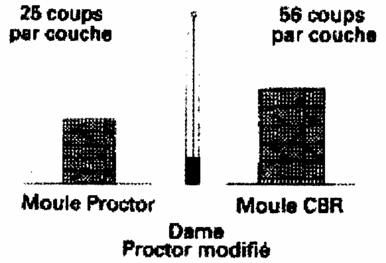
c) Choix du type de moule :

- est imposé par la granularité du matériau et d'utilisation envisagée des résultats de l'essai comme indiqué sur le diagramme suivant :

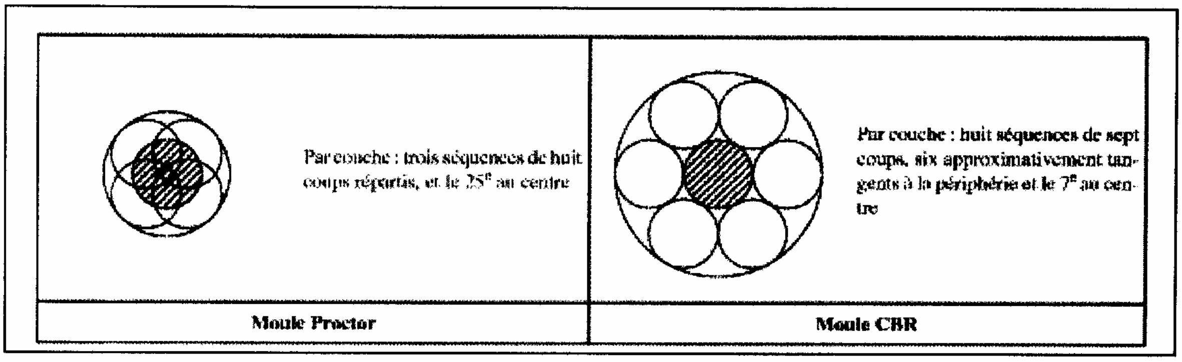


d) Exécution de l'essai :

- les choix du type de moule et de la nature de l'essai à exécuter étant faits, on procède au compactage des éprouvettes humidifiées comme indiqué dans le tableau suivant :

Nature de l'essai	Caractéristiques de l'essai	Moule Proctor	Moule CBR	Schéma récapitulatif
Essai Proctor normal	Masse de la dame	2 490 g	2 490 g	3 couches, à raison de :  25 coups par couche; 56 coups par couche; Moule Proctor; Moule CBR; Dame Proctor normal
	Diamètre du mouton	50 mm	50 mm	
	Hauteur de chute	305 mm	305 mm	
	Nombre de couches	3	3	
	Nombre de coups par couche	25	56	
Essai Proctor modifié	Masse de la dame	4 535 g	4 535 g	5 couches, à raison de :  25 coups par couche; 56 coups par couche; Moule Proctor; Moule CBR; Dame Proctor modifié
	Diamètre du mouton	50 mm	50 mm	
	Hauteur de chute	457 mm	457 mm	
	Nombre de couches	5	5	
	Nombre de coups par couche	25	56	

- avant introduction du matériau dans le moule il y a lieu de :
  - ➢ solidariser : moule, embase et rehausse ;
  - ➢ lubrifier le cas échéant les parois du moule ;
  - ➢ placer le disque d'espacement au fond du moule CBR ;
  - ➢ placer éventuellement un papier-filtre ou un film plastique au fond du moule Proctor normal ou sur un disque d'espacement du moule CBR pour faciliter le démoulage ;
- introduire alors la quantité de matériau pour que la hauteur de la première couche après compactage soit légèrement supérieure au tiers ou au cinquième de la hauteur du moule respectivement pour l'essai Proctor normal et pour l'essai Proctor modifié ;
- compacter cette couche avec la dame correspondante en appliquant respectivement 25 ou 56 coups par couche suivant le schéma ci-dessous, et répéter l'opération autant de fois que l'exige le nombre de couche à réaliser ;
- après compactage de la dernière couche, retirer la rehausse, le matériau doit dépasser du moule d'une hauteur d'un centimètre maximum ;
- cet excédent est arasé soigneusement au niveau du moule en opérant radialement du centre vers la périphérie du moule ;
- si des éléments > 10 mm sont entraînés dans cette opération, en laissant des vides à la surface de l'éprouvettes, combler ceux-ci avec des éléments fins qui sont lissés avec la règle à araser ;
- la figure suivante ne donne le mode du repartir des coups de compactage sur la surface de moule :



- peser l'ensemble du moule avec le matériau :
  - ➢ s'il n'est pas prévu de poursuivre l'essai par la détermination des Indices CBR ou IPI on procède ou démoulage de l'éprouvette, en extraite ensuite un échantillon représentatif pour en déterminer la teneur en eau ;
  - ➢ si à l'inverse, on prévoit la détermination concomitante de IPI, on procède immédiatement après le compactage au poinçonnement de l'éprouvette et puis à son démoulage et à sa dessiccation pour mesurer de sa teneur en eau ;
  - ➢ si on prévoit le détermination concomitante et d'IPI et de CBR après immersion, il convient de compacter deux éprouvettes identiques, la première servant à la déterminer de l'IPI et de la teneur en eau, la seconde étant mise en immersion 4 jours puis poinçonnée ;
  - ➢ enfin, si on prévoit seulement la détermination concomitante de l'indice CBR après immersion, l'éprouvette est mise en immersion immédiatement après son compactage et la teneur en eau de moulage est alors déterminée avec l'excédent de matériau pré humidifié inutilisé dans la confection de l'éprouvette ;
- ces opérations sont répétées sur chacun des parts de matériaux pré humidifie dans les conditions décrites où paravent ;

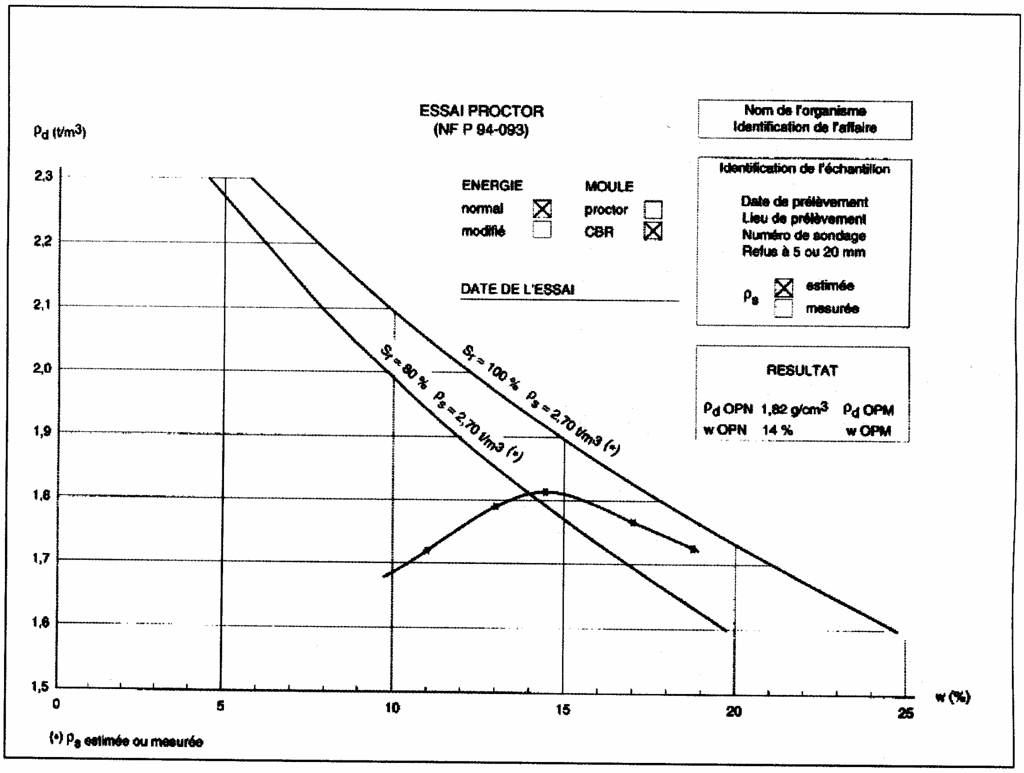
♦ **Particularités applicables aux matériaux traités avec de la chaux et/ou liant hydraulique :**

- pour déterminer les références de compactage d'un matériau avec de la chaux et/ou un liant hydraulique, préparer à partir de la prise d'essai du matériau non traité, des parts pré humidifiées et exécuter sur chacun d'elles les opérations suivantes :
  - ➢ **dans le cas de chaux seule -** introduire la quantité de chaux correspondant au dosage visé et malaxer le mélange manuellement, ou plus avantageuse à l'aide d'une mouture dont la granularité est stabilisée et dont la teinte est homogène ;
  - ➢ conserver le mélange ainsi obtenu dans un conteneur (sac ou boîte) hermétique durant 1 h ± 10 minute à une température de 5 à 30°C ;

- ➢ à l'expiration de ce délai et en fonction de l'énergie de compactage (Proctor normal ou modifié) considérée, compacter le mélange conformément aux modalités décrites dans le présent paragraphe ;
- ➢ **dans le cas du traitement avec un liant hydraulique seul –** exécuter les mêmes opérations que pour le traitement à la chaux seule, à l'exception du délai de conservation qui est ramené à 15 min ;
- ➢ **dans le cas d'un traitement mixte chaux plus liant :**
- ➢ procéder tout d'abord à la fabrication et à la conservation du mélange matériau chaux, comme décrit pour le traitement à la chaux seule, puis reprendre ce mélange pour le traiter avec le liant hydraulique, comme décrit pour le traitement avec un liant hydraulique seul ;
- ➢ à l'expiration du délai de conservation avec le liant hydraulique de 15 min maximum et en fonction de l'énergie de compactage (Proctor normal ou modifié) considérée, compacter le mélange conformément aux modalités décrites dans le présent paragraphe ;

e) Expression des résultats :

- ♦ Pour chaque éprouvette compactée il convient de calculer :
  - la teneur en eau ;
  - la masse de matériau sec contenu dans le moule ;
  - la masse volumique du matériau sec en tenant compte du volume réel du moule utilisé ;
- ♦ Les valeurs des masses volumiques du matériau sec et des teneurs en eau correspondantes sont portées sur un graphique ρ_d **= f (w%) :**



- Le rapport des échelles est de 2%de teneur en eau pour 0,1 t/m^3 de masse volumique ;
- On trace en suite la courbe ajustée sur les points expérimentaux ;
- Sauf dans le cas des matériaux très perméables, cette courbe présente un maximum dont les cordonnées sont dénommées respectivement masse volumique sèche optimum et teneur en eau Optimum Proctor Normal (OPN) ;
- Ce résultat est exprimé à 0,01 t/m^3 prés pour la masse volumique et à 0,1 points prés pour la teneur en eau (exprimé en pourcentage) ;
- Il convient de faire figurer également sur le graphique précèdent les courbes d'équation :

$$\rho_d = \frac{S_r \times \rho_s}{s_r + w \dfrac{\rho_s}{\rho_w}}$$; où on trouve :

s_r – 100 et 80%/m^3 ;
ρ_w – 1 t/m^3 ;
ρ_s – 2,70 t/m^3 ;

f) Procès-verbal d'essai :

- Le procès-verbal d'essai doit faire apparaître les informations minimales suivantes :
  - le nom de l'organisme qui a réalisé l'essai ;
  - la référence au présent document ;
  - l'identification de l'affaire (titre, numéro d'affaire, etc.) ;
  - l'identification de l'échantillon (date et lieu de prélèvement, numéro de sondage, profondeur)
  - la date de début de l'essai ;
  - le type d'essai réalisé (Proctor normal ou modifié) ;
  - le type de moule utilisé (Proctor ou CBR) ;
  - la méthode utilisé pour la détermination des teneurs en eau ;
  - le graphiques de la masse volumique sèche en fonction des teneurs en eau ainsi que la points expérimentaux ;
  - les courbes de saturation 80% et 100% et la valeur (ρ_s**)** retenue ;
  - le pourcentage de refus éventuel à 20 mm ou à 5 mm ;
  - les valeurs :
    - Masse volumique sèche : ρ_d**OPN** ou ρ_d**OPM ;**
    - Teneur en eau optimale correspondante : **wOPN** ou **wOPM ;**

- Les calculs de cet essai on peut le ramasser dans un feuille de calcul :

		1er point	2e point	
Teneur en eau :				
Poids total humide	p_h	....	....	....
Poids total sec	p_s	....	....	....
Tare	p_0	....	....	(etc..., pour six points).
Poids de l'eau	$p_e = p_h - p_s$	....	....	
Poids du sol sec	$p_{ss} = p_s - p_0$	....	....	
Teneur en eau	$\omega_i = \frac{p_e}{p_{ss}}$	....	....	....
Moyenne :	$\omega = \frac{\omega' + \omega''}{2}$	☐	☐	....
Densité apparente sèche :				
Poids total humide	P_h	....	....	....
Poids du moule vide	P_m	....	....	....
Poids du sol humide	$P_{sh} = P_h - P_m$	....	....	....
Poids du sol sec	$P_{ss} = \frac{P_{sh}}{1 + \omega}$	....	....	....
Volume du moule	V	....	....	....
$D_{app.}$ du sol sec	$d_s = \frac{P_{ss}}{V}$	☐	☐	....

g) Corrections pour les matériaux comportant moins 30% d'éléments de dimensions supérieure à 20 mm

- Les formules de correction supposent que les éléments 20/D :
  - ne retiennent pas d'eau ;
  - occupent un volume $V = M / \rho_s$;
  - flottent dans la fraction fine du matériau ;
- Dans ce cas les formules de corrections sont de suivante manière :

$$w' = w - \Delta w ; \quad \text{où :} \quad \Delta w = \frac{M}{100} \times w ; \quad \text{pour la teneur en eau ;}$$

et :

$$\rho'_d = \frac{\rho_d}{1 + \frac{m}{100}\left(\frac{\rho_d}{\rho_s} - 1\right)} ; \quad \text{pour la masse volumique sèche}$$

II.6. Travaux Pratique n° 6 : CALIFORNIEN BEARING RATIO (CBR)

6. 1. Objectif visé : le présent document décrit l'appareillage spécifique et les modalités du processus opératoire des essais permettant la détermination des grandeurs utilisées pour caractériser un sol ou un matériau élaboré, en tant que support ou constituant d'une structure de chaussée, comme :

- **indice CBR après immersion ;**
- **indice CBR immédiat ;**

et une grandeur utilisée pour évaluer l'aptitude d'un sol à supporter la circulation des engins de chantiers :

- **indice portant immédiat (IPI) ;**

Cet essai est fait après la norme : NF P 94-078.

6. 2. Durée du TP : 6 heures

6. 3. Matériel nécessaire :

a) Pour confectionner des éprouvettes :

- les moules CBR ;
- les dames ou machines de compactage Proctor normal et Proctor modifié
- l'ensemble des accessoires (plaque de base, rehausse, disque d'espacement, règle à araser, etc.) ;
- le matériel d'usage courant (balance, étuve, bacs, etc.) ;

b) Matériel de poinçonnement :

- une presse d'une capacité efficace d'au moins 50 kN et possédant une course d'au moins 10 mm ;
- un poinçon cylindrique en acier de 49,6mm ± 0,1 mm de diamètre, soit d'une section circulaire de 19,32 cm² ± 0,08 cm², et d'une dizaine de centimètres de longueur minimum ;
- un dispositif permettant l'enfoncement du poinçon dans le matériau à une vitesse de 1,27 mm/min. ± 0,1 mm/min. ;
- un dispositif de mesure de l'enfoncement du poinçon garantissant la mesure avec une incertitude absolue maximum de 0,1mm ;
- un dispositif de mesure des efforts de poinçonnement avec une capacité adaptée à l'effort mesuré et une précision de 1% ;

c) Matériel de mise en immersion et de mesure du gonflement

- un ou plusieurs bacs de hauteur suffisante pour assurer l'immersion complète de l'éprouvette, tout en ménageant au-dessous de chacune d'elle une lame d'eau d'au moins 10 mm de hauteur ;

- un disque dit « de gonflement », métallique ou en matière plastique de 150 mm de diamètre et d'un poids n'excédant pas 300 g environ perforé sur toute sa surface par au moins 25 trous de 3 mm $\pm$ 1 mm de diamètre, uniformément répartis ;
- ce disque comporte perpendiculairement en son centre, une tige de hauteur réglable, permettant à réaliser la mise au zéro du dispositif de mesure du gonflement, avant la mise en immersion ;
- une série d'au moins trois surcharges constituées chacune d'un disque de 150 mm $\pm$ 1 mm de diamètre extérieur comportant un évidemment central cylindrique de Φ 54 mm $\pm$ 1 mm permettant le passage aisé du poinçon et avec la masse de chaque surcharge de 2,3 kg $\pm$ 0,1 kg ;
- les surcharges peuvent être réalisées en deux pièces par sectionnement du disque défini précédemment suivant un plan diamétral afin de faciliter leur mise en place sur l'éprouvette et autour du poinçon ;
- un dispositif permettant la mesure du gonflement avec une incertitude absolue maximum 0,01 mm et la plaque de mesure doit être de 20 mm minimum ;

6. 4. Description du TP :

- ♦ Cet essai s'applique aux sols, matériaux rocheux, sous-produits industriels à condition que la proportion des éléments avec Dmax = 20 mm ne dépasse 30% et aussi à ces mêmes matériaux lorsqu'ils sont mélangés avec différents produits tels que chaux aérienne, liants hydrauliques ou pouzzolaniques, fibres,
- ♦ Le principe général de l'essai consiste à mesurer les forces à appliquer sur un poinçon cylindrique pour le faire pénétrer à vitesse constante dans une éprouvette de matériau ;
- ♦ Les valeurs particulières des deux forces ayant provoqué deux enfoncements conventionnels sont respectivement rapportées aux valeurs des forces observées sur un matériau de référence pour les mêmes enfoncements ;
- ♦ L'indice recherché est défini conventionnellement comme étant la plus grande valeur, exprimée en pourcentage, des deux rapports ainsi calculés ;
- ♦ Les valeurs des paramètres – section du poinçon, vitesse d'enfoncement, enfoncement conventionnel, forces observées sur le matériau – sont normalisées et précisées en précédant ;
- ♦ Les indices **CBR** et **IPI** ne constituant pas des caractéristiques intrinsèques d'un sol, mais ces grandeurs dépendent en partie de la nature du sol (granularité et plasticité) et elles dépendent aussi de sa teneur en eau de sa masse volumique sèche et de son dégrée de saturation, qui sont caractéristiques d'état, celle-ci étant fonction des conditions de mise en œuvre et d'environnement ;
- ♦ Donc l'indication de toute valeur d'un indice CBR ou IPI d'un matériau n'a de sens que si elle est assortie des caractéristiques d'état du sol prises en considération dans la confection de l'éprouvette ;

6. 5. Déroulement du TP :

a) Confection des éprouvettes :

- Il convient tout d'abord de choisir les différents ensembles de conditions d'état du sol – masse volumique sèche, teneur en eau, état de saturation – pour lesquels on veut réaliser l'essai ;
- Lorsque la dimension maximale des éléments du sol à étudier est inférieure à 20 mm, l'intégralité du sol est soumise à l'essai ;
- Si le sol contient des éléments supérieurs à 20 mm dans une proportion inférieure à 30%, ils sont éliminés par tamisage et l'essai est alors réalisé sur la fraction restante ;
- Pour chaque ensemble de conditions d'état considéré, il convient de préparer 5,5 kg minimum de matériau dans le cas où l'on recherche l'indice CBR immédiat et 7,0 kg minimum dans le cas où l'on recherche l'indice CBR immersion ;
- On procède ensuite à la préparation du sol et au compactage dans les moules suivant les modalités décrites ;
- Dans le cas où l'on détermine l'indice CBR immersion, la teneur en eau de confection de l'éprouvette est déterminée à partir du surplus de matériau, selon une des méthodes normalisées ;
- Le moule contenant l'éprouvette est ensuite désolidarisée de sa plaque de base, retourné pour que la face supérieure de l'éprouvette de retrouve en contact avec l'embase et celle-ci soit alors à nouveau solidariser avec le moule ;
- On procède à l'extraction du disque d'espacement puis à l'exécution du poinçonnement ou la mise en immersion selon l'indice recherché ;

b) Exécution du poinçonnement :

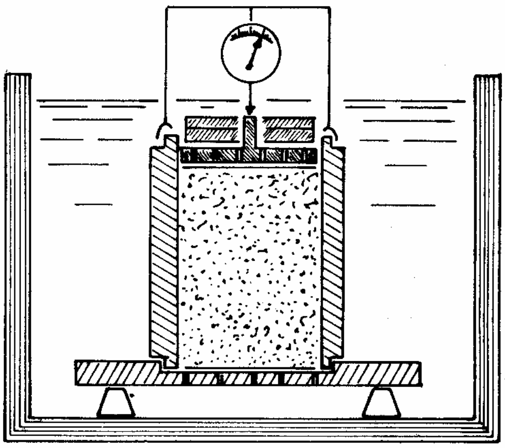
- Les modalités d'exécution du poinçonnement différent selon que l'on détermine IPI ou CBR :

- **Si l'objet de l'essai est la détermination de l'indice IPI :**
  - placer ensemble : embase, moule, éprouvette sur la presse, en position centrée par rapport au piston de poinçonnement de la manière suivante ;
  - mettre en contact la surface supérieure de l'éprouvette avec le piston ;
  - initialiser les dispositifs de mesure des forces et des enfoncements ;
  - exécuter le poinçonnement en maintenant la vitesse de pénétration à 1,27 mm/min. ± 0,1 mm/min. ;
  - établir la courbe effort – déformation correspondant, au moins, aux enfoncements de 1,25 mm ; 2 mm ; 2,5 mm ; 5 mm ; 7,5 mm ; 10 mm ;
  - déterminer la teneur en eau de l'éprouvette selon une des méthodes normalisées ;
- **Si l'objet de l'essai est la détermination de l'indice CBR immédiat :**
  - interposer deux surcharges dans le volume libéré par le disque d'espacement ;

- s'il est prévu que la contrainte apportée par la chaussée sur le sol sera supérieure aux 4,6 kg des surcharges ainsi constituées, il y a lieu d'ajouter autant de surcharges que nécessaire ;
- L'ensemble : moule, plaque de base et surcharges est alors posé sur la presse et on exécute ensuite le poinçonnement comme indique précédemment ;

♦ **Si l'objet de l'essai est la détermination de l'indice CBR immersion :**

- positionner le disque de gonflement sur l'éprouvette avant mettre en place les surcharges comme indiqué précédemment ;
- mettre en place et initialiser le dispositif de mesure de gonflement ;
- immerger l'ensemble de sorte que l'éprouvette soit recouverte par une hauteur d'eau d'au moins 20 mm et qu'une lame d'eau au moins 10 mm soit présente sous le moule, comme sur la figure suivante :



- après quatre jours d'immersion (± 2 heures), relever la valeur de gonflement total atteint ;
- retirer le moule et l'éprouvette du bac à immersion et après égouttage, exécuter le poinçonnement comme indiqué précédemment ;

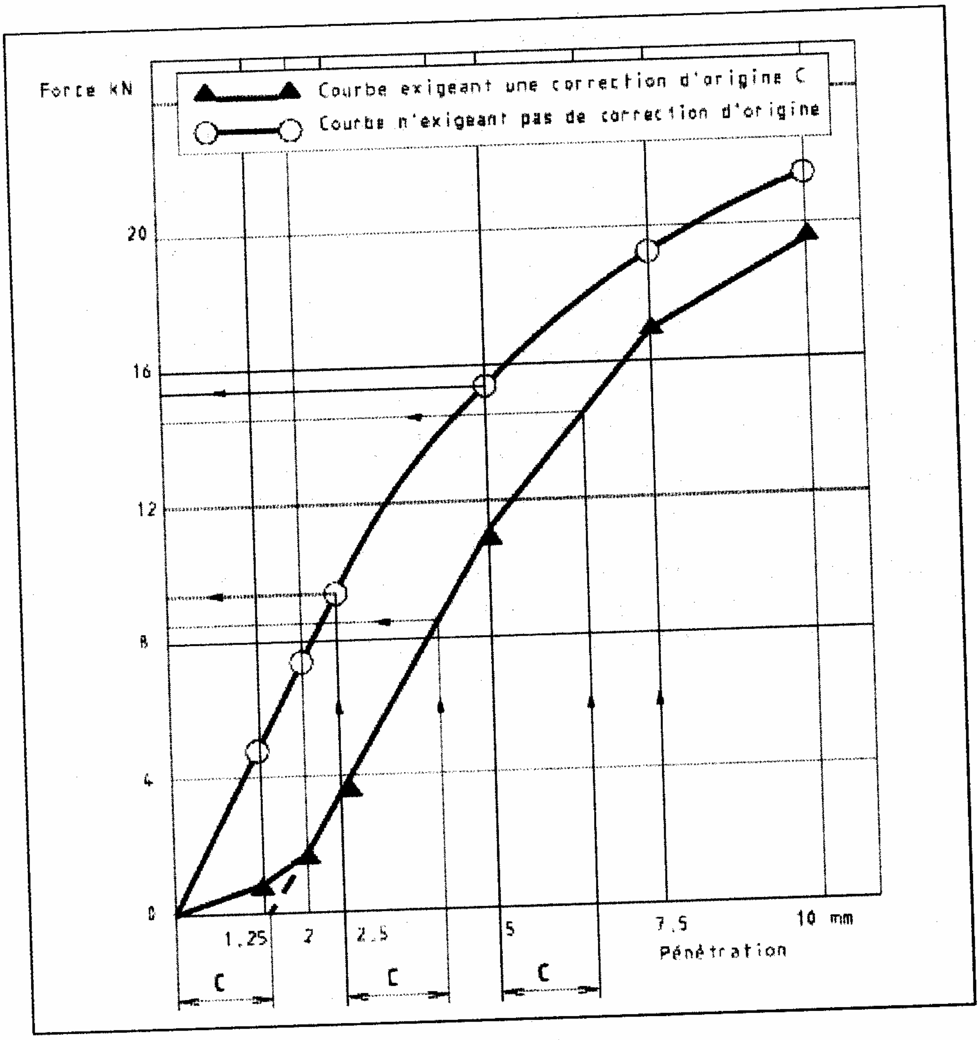
c) Calculs et résultats :

♦ On calcule les deux valeurs suivantes :

$$\frac{\textbf{Effort de pénétration à 2,5 mm d'enfoncement (en kN)}}{\textbf{13,35}} \times 100 \;;$$

$$\frac{\textbf{Effort de pénétration à 5 mm d'enfoncement (en kN)}}{\textbf{19,93}} \times 100 \;;$$

♦ L'indice recherché est par convention la plus grande de ces deux valeurs ;
♦ Si nécessaire, faire une correction d'origine comme sur la figure suivante ;



d) Procès-verbal :

- Le rapport d'essai doit comporter les informations minimales suivantes :
  - le nom de l'organisme qui a réalisé l'essai ;
  - la référence à la présente norme ;
  - l'identification de l'affaire (titre, numéro,) ;
  - l'identification de l'échantillon (date et lieu de prélèvement, numéro de sondage, profondeur,) ;
  - la date du début de l'essai ;
  - la méthode utilisée pour la détermination des teneurs en eau ;
- L'indice recherché étant déterminé, on précise sur la feuille d'essai :
  - s'il s'agit de IPI, CBR immédiat ou CBR immersion ;
  - la masse volumique sèche de l'éprouvette, exprimée en valeur absolue et en pourcentage de la masse volumique sèche maximum Proctor normal ou modifié du sol ;

- la teneur en eau de confection de l'éprouvette, exprimée en valeur absolue et en pourcentage de la teneur en eau Proctor optimum normal (OPN) ou modifié (OPM) du sol ;
- dans le cas de l'indice CBR immersion on précise en outre la teneur en eau après immersion de l'éprouvette et la valeur de la déformation de l'éprouvette G, exprimée en pourcentage :

$$\mathbf{G = \frac{\Delta h}{h} \times 100 ;}$$

e) Mode d'interprétation – étude CBR :

♦ La portance d'un sol dépendant considérablement de ses caractéristiques d'état, une valeur particulière d'un indice CBR correspondant à une masse volumique sèche, une teneur en eau, un dégrée de saturation donnés ne permet pas en général de préjuger valablement du comportement de ce sol, en tant que support d'une chaussée ;

♦ En effet, dans ce fonctionne l'état réel dans lequel il risque de se trouver peut varier dans un assez large plage, compte tenu des aléas des conditions hydriques et de mise en œuvre ;

♦ Pour pouvoir proposer une interprétation qui soit fondée, il est plus souvent indispensable de déterminer les valeurs des indices CBR du sol pour un ensemble de conditions d'état balayant le domaine couvert par les aléas précités.

♦ Il convient alors d'exécuter une étude CBR selon le processus décrit ci –après :

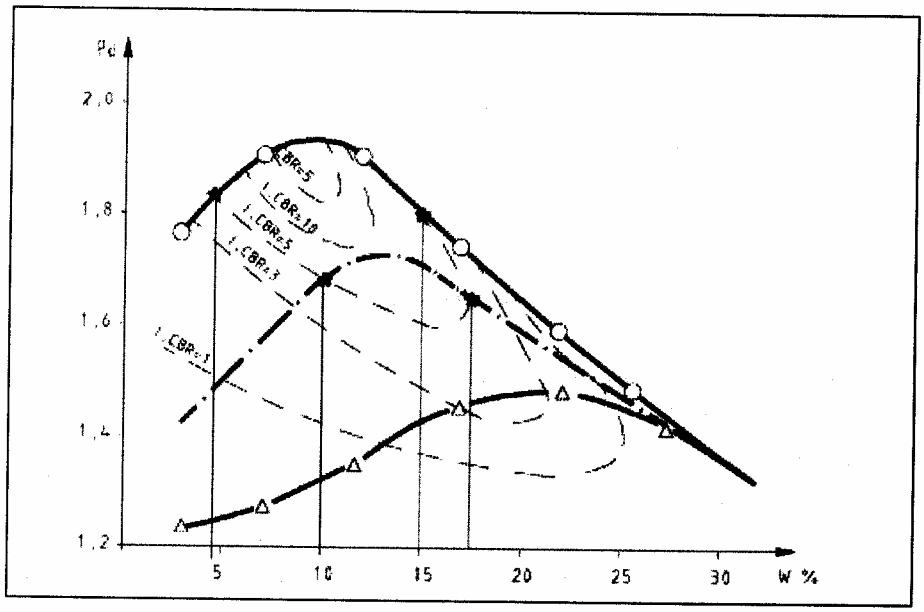
❖ <u>Choix des conditions de masse volumique sèche</u> – on doit choisir trois énergies de compactage :
  - l'énergie Proctor modifié,
  - l'énergie Proctor normal,
  - une énergie réduite, correspondant à environ 25% de l'énergie Proctor normal ;

❖ <u>Choix de teneurs en eau</u> – ils sont cinq teneurs en eau répartie dans une plage couvrant l'étendue des teneurs en eau possible du sol, sont choisies dans le cas de chantier considéré ;

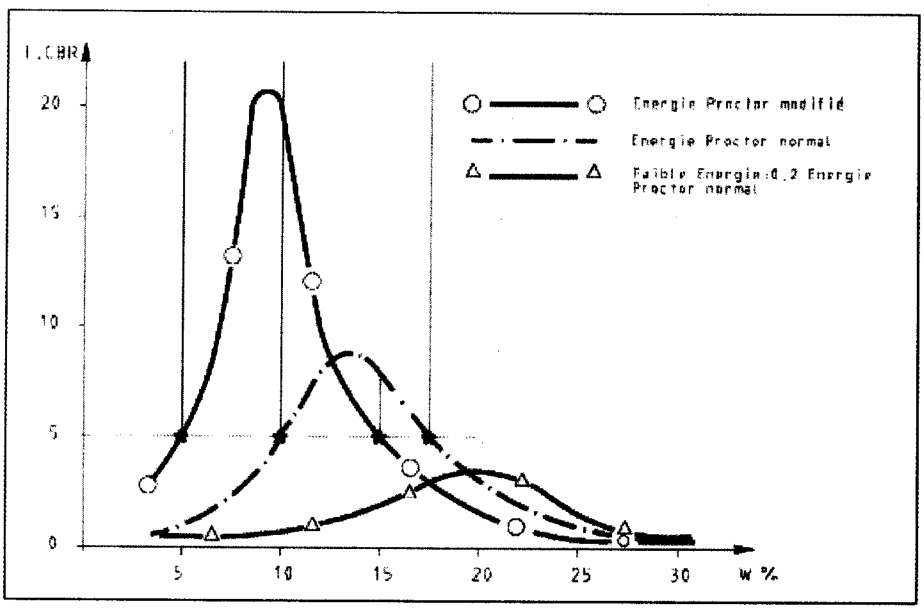
❖ <u>Choix des conditions d'état de saturation</u> – en absence de données fiables sur les teneurs en eau d'équilibre du sol la chaussée, on adopte l'état de saturation obtenu après quatre jours d'immersion ;

❖ <u>Les valeurs d'indice CBR immersion</u> – trouvées pour les 3 x 5 = 15 couples teneur en eau – masse volumique sèche, sont alors portées sur deux graphes, tels que ceux représentés en figures suivantes :

- sur le graphe de la première figure on porte les différentes valeurs de la masse volumique sèche et de la teneur en eau pour les trois énergies de compactage considérées ;



- sur le graphe de la deuxième figure on porte en correspondance de l'échelle des teneurs en eau du graphe de la première figure, les valeurs de l'indice CBR immersion ;



- enfin, on reporte sur le graphe de la première figure le réseau des courbes iso-CBR après immersion, il est immédiatement possible d'évaluer les variations de la portance CBR du sol, correspondant à des fourchettes réalistes de variation de ses caractéristiques d'état une fois mis en œuvre et par suite de définir un indice de dimensionnement de la structure, tenant compte des risques admis et des prescriptions imposées par le concepteur.

II.7. Travaux Pratique n° 7 : ESSAI DE SEDIMENTOMETRIE

7. 1. Objectif visé : la présente essai a pou objet la détermination de la distribution pondérale de la taille des particules fines d'un sol. Il spécifie l'appareillage nécessaire et fixe le mode opératoire à respecter et précise les résultats à présenter. Cet essai est réglementé par la norme NF P 94-057.

7. 2. Durée du TP : 4 heures ;

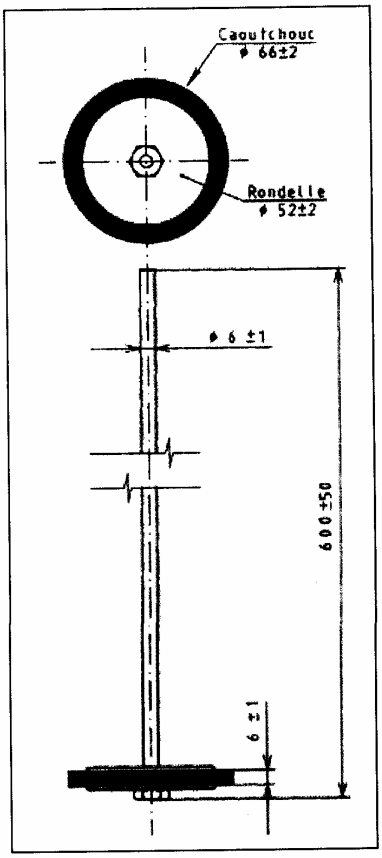
7. 3. Matériel nécessaire :

a) Pour la préparation du sol :

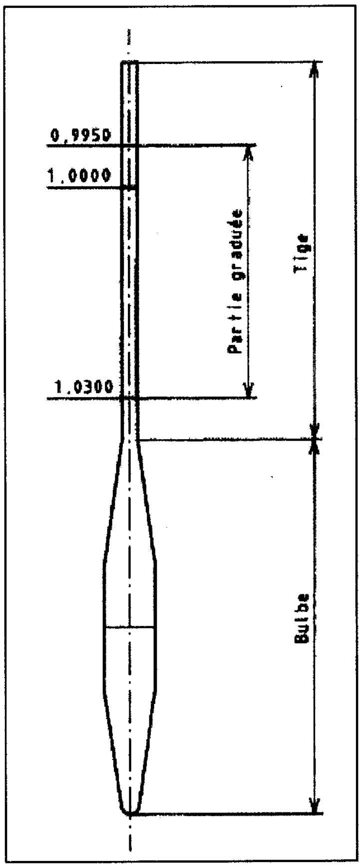
- une balance dont les portées maximale et minimale sont compatible avec les masses à peser et telle que pesées sont effectuées avec une incertitude de 1/1.000 de la valeur mesurée ;
- un tamis à maille carrée de 80 μm d'ouverture et de diamètre supérieur ou égal à 250 mm ;
- un bac non altérable et de dimensions minimales 60 x 40 x 12 cm pour recueillir le tamisât ;
- une enceinte thermique ou une étuve de dessiccation à température réglable à 105°C et 50°C, de classe d'exactitude C ;

b) Pour essai :

- un mortier de 20 cm de diamètre minimal avec son pilon en matériau souple pour séparer les particules passées au tamis de 80μm d'ouverture ;
- un agitateur mécanique avec son récipient, la vitesse de rotation de l'agitateur doit pouvoir être réglée jusqu'à 10.000 rot/min. et il doit être de type « plongeant », c'est-à-dire que l'arbre support de la palette rotative est introduit dans le récipient contenant la solution et ce récipient doit avoir une contenance minimale de 600cm^3 ;
- un mélange d'eau distillée ou déminéralisée d'un floculant pour imbiber puis disperser l'échantillon ;
- ce mélange est constitué à partir de 440 cm^3 d'eau distillée ou déminéralisée et de 60 cm^3 d'une solution à 5% d'hexamétaphosphate de sodium, préparée et conservée à l'abri de la lumière depuis moins d'un mois ;
- deux éprouvettes cylindriques en verre transparente, graduées et d'une contenance minimale de 2.500 cm^3, avec un diamètre intérieure de 85 mm ;
- une réserve de 4.000 cm^3 d'eau distillée ou déminéralisée ;
- un agitateur manuel pour homogénéiser la suspension avant essai comme sur la figure suivante :



- un densimètre avec une exactitude de 0,0005 et une plage d’utilisation de 0,995 0 à 1,030 0.



- un thermomètre de mesure de la température avec une exactitude de 0,5°C et une plage d'utilisation de 10 à 35°C ;
- un chronomètre qui doit permettre un affichage de la mesure du temps à la seconde prés ;
- un thermomètre de la salle d'essai, qui doit être placé en permanence dans la salle d'essai ;

7. 4. Description du TP :

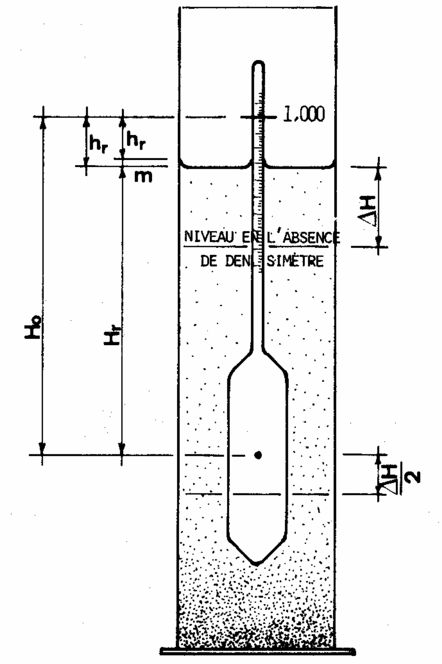
- ♦ Cet essai s'applique aux éléments d'un sol naturel passant à travers le tamis à maille carrée de 80 µm d'ouverture ;
- ♦ Les particules de taille inférieure à 1 µm ne peuvent être différenciées par cet essai ;
- ♦ L'analyse granulométrique par sédimentation est un essai géotechnique qui complète l'analyse par tamisage d'un sol et qui peut être nécessaire à sa description et à sa classification ;
- ♦ Le principe de cet essai consiste à utiliser le fait que dans un milieu liquide au repos, la vitesse de décantations des grains fins à très fins est fonction de leur dimension ;
- ♦ La loi de Stokes donne, dans le cas des grains sphériques de même masse volumique, la relation entre le diamètre des grains et leur vitesse de sédimentation ;
- ♦ Par convention, cette loi est appliquée aux éléments d'un sol pour déterminer des diamètres équivalents de particules ;
- ♦ Les particules inférieures à 80 µm séparées du reste du sol par tamisage sont mises en suspension dans l'eau additionnée d'un défloculation et les particules sédimentent à différentes vitesses en relation avec leur taille ;
- ♦ Au moyen d'un densimètre est mesurée l'évolution dans le temps de la masse volumique de la solution et la profondeur d'immersion de l'appareil ;
- ♦ La distribution pondérale de la taille des particules est calculée à partir de ces données ;

7. 5. Déroulement du TP :

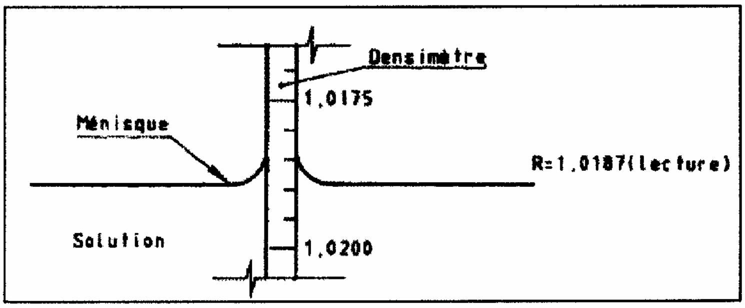
a) Préparation de la prise d'essai

- ♦ Le tamisât, au tamis de 80µm, de l'échantillon de sol, préparé selon la norme NF P 94-056 est recueilli avec son eau de lavage dans un bac ;
- ♦ Le tout est mis à décanter et une fois redevenu claire, l'eau du bac est siphonnée sans entraîner d'éléments fins ;
- ♦ Le bac et son contenu sont ensuite placés dans une étuve ;
- ♦ Conventionnellement, l'évaporation de l'eau est considérée comme achevée si la masse du matériau contenu dans le bac ne varie pas plus de 2 /1.000 entre deux pesées successives effectuées immédiatement après la sortie de l'étuve ;
- ♦ L'intervalle entre deux pesées est au minimum :
  - de 4 heures dans le cas d'un étuvage à 105°C ;
  - de 8 heures dans le cas d'un étuvage à 50°C ;

- Sur le tamisât séché, désagrégé avec le pilon dans le mortier et puis homogénéisé, prélever une prise d'essai de 80 g ± 10 g ;
- Introduire la prise d'essai dans le récipient utilisé avec l'agitateur mécanique, ajouter 500 cm^3 du mélange décrit antérieure et garder à la température ambiante ;
- Laisser imbiber pendant au moins 15 heures à la température ambiante ;
- la prise d'essai est dispersée dans la solution d'eau et de défloculant au moyen de l'agitateur mécanique qui doit fonctionner pendant 3 minutes à 10.000 rot/min.
- Verser la suspension dispersée dans une éprouvette d'essai immédiatement après la fin de l'agitation mécanique ;
- Rincer le récipient ainsi que l'arbre et les palettes de l'agitateur avec l'eau distillée ;
- Le liquide de rinçage est recueilli dans l'éprouvette afin d'éviter de perdre une partie de l'échantillon de sol lors du transfert ;
- Compléter par l'eau distillée à la température ambiante jusqu'à 2.000 cm^3 ;
- Verser 2.000 cm^3 de la même eau distillée dans une seconde éprouvette témoin et y plonger le thermomètre et le densimètre parfaitement propres ;
- Agiter vigoureusement verticalement la suspension au moyen de l'agitateur manuel pour obtenir une concentration uniforme sur toute la hauteur de l'éprouvette ;
- Retirer l'agitateur manuel et déclencher au même moment le chronomètre : par convention il s'agit du début de l'essai ;
- Plonger le densimètre avec précaution dans la suspension immédiatement après le déclenchement du chronomètre :



- Faire les lectures depuis le début de l'essai aussi longtemps que nécessaire, aux temps suivent : 0,5 ; 1 ;2 ;5 ;10 ;20 ;40 ;80 ;240 ;1440 minutes ;
- Noter à chaque lecture la densité au sommet du ménisque comme sur la figure :



- Procéder aux trois premières lectures à 0,5 ;1 et 2 min. sans retirer le densimètre de la solution ;
- A partir de la troisième lecture, retirer le densimètre de la solution après chaque mesure, le nettoyer puis plonger dans l'éprouvette d'eau distillée ;
- A partir de quatrième lecture plonger le densimètre avec précaution dans la solution au minimum 30 secondes avant la mesure ;

b) Expression des résultats :

- Toutes les lectures sont notées dans une feuille de calcul de la suivante forme :

SÉDIMENTOMÉTRIE

Temps de lecture	Lecture R	Lecture corrigée R_1	D	p_{essai}	p_{global}
30 sec.	....	....	70 µm	....	....
1 min.	....	....	50 µm	....	....
2 min.	....	....	35 µm	....	....
5 min.	....	....	25 µm	....	....
10 min.	....	....	18 µm	....	....
20 min.	....	....	12 µm	....	....
40 min.	....	....	9 µm	....	....
1 h 20 min	....	....	6 µm	....	....
4 h.	....	....	3,5 µm	....	....
24 h.	....	....	1,5 µm	....	....

- Pour chaque série de lectures, **le pourcentage pondéral d'éléments inférieurs ou égaux à D** contenus dans la suspension et le diamètre équivalent D des plus grosses particules non sédimentées sont déterminés en suivant la procédure définie ci-après :

$$P = \frac{V_s}{M} \times \frac{P_s}{P_s - P_w} \times P_w \left(\frac{P_t}{P_w} - 1\right) ;$$

où on trouve :

P – est le pourcentage des particules de diamètre inférieur ou égal à D ;
V_s – est le volume de la suspension ;
m – est la masse volumique de sol sec prélevée sur le tamisât à 80µm ;
Ps – est la masse volumique des particules solides ;
Pw – est la masse volumique de l'eau distillée à la température d'essai ;
Pt – est la masse volumique de la suspension au temps (t) ;

- **La masse volumique des particules solides du sol** (P_s) – est déterminée conformément à la norme NF P 94-054 et cette valeur doit être utilisée et notée dans le procès-verbal.

- **La masse volumique de la suspension à l'instant (t)** – est obtenue à partir de la formule suivante :

$$P_t = R_c \times P_w = (R + C_t + C_m + C_d) \times P_w \; ;$$ où on trouve :

R_c – est la lecture corrigé du densimètre à l'instant ;
R – est la lecture du densimètre (sommet du ménisque) à l'instant ;
C_t – est la correction due aux variations de température en cours d'essai
C_m – est la correction due au ménisque ;
C_d – est la correction due au défloculant ;
C_t , C_m ,C_d – sont des facteurs obtenus lors de l'étalonnage de l'appareillage ;

- **Le diamètre équivalent (D)** – des plus grosses particules non sédimentées à l'instant (t) est calculé comme suit :

$$D = \left(\frac{1}{g} \times \frac{18\eta}{P_s - P_w} \times \frac{H_t}{t} \right)^{0.5} \; ;$$ où on trouve :

η - est la viscosité dynamique de la solution à l'instant ;
P_s – est la masse volumique des particules solides ;
P_w – est la masse volumique de l'eau distillée à la température d'essai (θ**)**, et conventionnellement on prend :
- **P_w** = 999 kg/m^3 si on a 12°C **<** θ **<** 18°C ;
- **P_w** = 998 kg/m^3 si on a 18°C **<** θ **<** 24°C ;
- **P_w** = 997 kg/m^3 si on a 24°C **<** θ **<** 30°C ;

g – est l'accélération de la pesanteur ;
H_t – est la profondeur effective du centre de poussée du densimètre à l'instant (t) ;
t – est le temps écoulé depuis le début de l'essai ;

- **La viscosité dynamique de la solution (η)** – est déterminée par l'aide de la relation suivante :

$$\eta = \frac{0,00179}{1 + \alpha\theta + \beta\theta^2} \;;$$ où on trouve :

η - est la viscosité dynamique en poiseuille ;
θ - est la température exprimée en dégrée Celsius de l'éprouvette témoin à l'instant (t) ;
α - est égale à 0,003368 ;
β - est égale à 0,00022 ;

♦ **La profondeur effective du centre de poussée** – est déterminée avec l'aide de la relation suivante :

$$H_t = H - 100 \times H_1 \times (R + C_m - 1) + H_c \;;$$ où on trouve :

H_t – la profondeur effective du centre de la poussée du densimètre à l'instant (t) ;
H – est la distance séparant le milieu du bulbe du densimètre de la graduation 1,000 ;
H_1 – est la distance séparant la graduation 1,000 de la graduation 0,010 ;
C_m – est la correction due au ménisque ;
H_c – est le déplacement du niveau de la solution lié à l'introduction du densimètre dans l'éprouvette d'essai ;

♦ **La hauteur de déplacement de la solution due au densimètre –** pour le calcul de la profondeur effective du centre de poussée on détermine la hauteur de déplacement de la solution due à l'introduction du densimètre dans l'éprouvette d'essai de la manière suivante :

- pour les premières trois lectures on prend par convention **$H_c = 0$;**
- à partir de la quatrième lecture on adopte par convention :

$$H_c = 0,5 \times \frac{V_d}{A} \;;$$ où on trouve :

H_c – la hauteur de déplacement de la solution au densimètre ;
V_d – est le volume de densimètre ;
A – est l'aire de la section droite de l'éprouvette d'essai ;
V_d et A étant caractéristiques obtenues lors de l'étalonnage de l'appareil ;

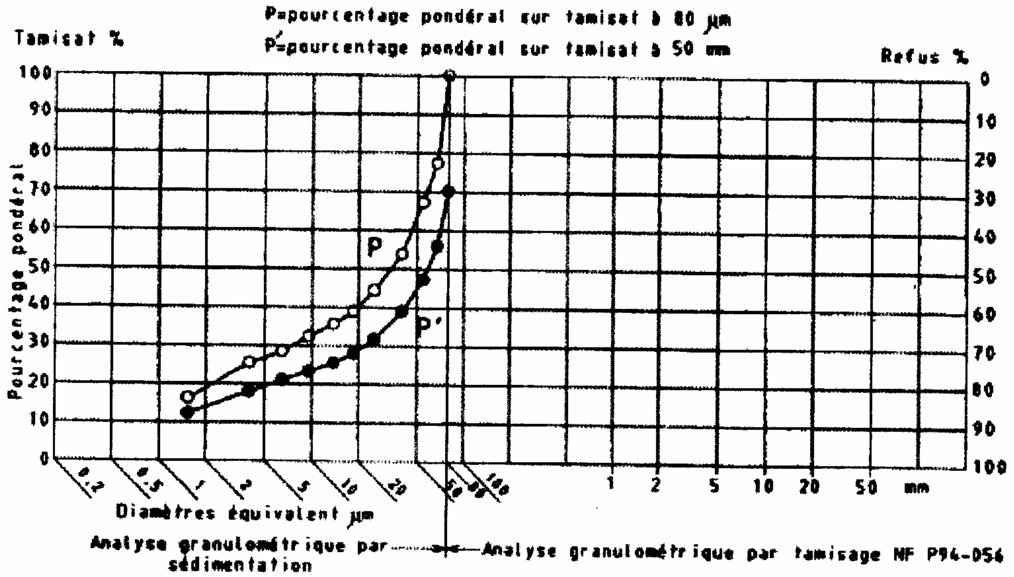
♦ **Procès-verbal d'essai** – doit contenir au minimum les informations suivantes :

- la référence de la présente norme ;
- l'identification de l'essai (origine de l'échantillon, numéro de dossier, date)
- le nom de la firme qui a réalisé l'essai ;

- le pourcentage de passant au tamis à maille carrée de 80 µm ;
- la masse volumique des particules solide su sol testé ;
- les caractéristiques du densimètre et d'éprouvette ;
- les mesures de la densité et de température avec le facteur correcteur $\mathbf{C_t}$;
- les résultats du calcul du pourcentage (p) et du diamètre équivalente (D) ;
- le pourcentage ramené à la masse initiale du tamisât du sol dans le cas d'une analyse granulométrique selon la norme NF P 94-056 ;

♦ La distribution de la taille des particules doit être présentée sous forme graphique sur un papier semi-logarithmique sur lequel la taille des particules en mm sera portée en abscisse et leur pourcentage pondéral en ordonnée comme sur la figure suivante :

Nom du laboratoire	**ANALYSE GRANULOMÉTRIQUE PAR SÉDIMENTATION** Essai effectué conformément à la norme NF P 94-057 Dossier : Date :



ORIGINE DE L'ÉCHANTILLON
Site :
Sondage : S1
Profondeur : 1,25 m

MASSE VOLUMIQUE DES PARTICULES SOLIDES
Mesuré : — conventionnel : 2 700 kg/m³
Pourcentage de passant au tamis de 80 µm = 71 %

Densimètre : H_0 = 13 cm H_1 = 3,8 cm h_1 = 18,4 cm V_d = 73 cm³

Facteurs correcteurs : C_m = 0,000 4 C_d = − 0,000 8 Éprouvette : A = 57 cm²

Temps de lecture h	min	s	R Lecture densimètre	Température (°C)	C_t Correction température	P % sur tamis à 80 µm	P' % sur tamis à 50 mm	D (µm)
—	—	30	1,018 0	22,8	0,001 1	76,5	54,3	73
—	1	—	1,015 4	22,8	0,001 1	66,9	46,8	53
—	2	—	1,012 6	22,8	0,001 1	54,4	38,6	39
—	5	—	1,010 1	22,8	0,001 1	44,2	31,4	25
—	10	—	1,008 7	22,8	0,001 1	38,5	27,3	18
—	20	—	1,007 6	23,0	0,001 4	35,2	25,0	13
—	40	—	1,007 0	23,0	0,001 4	32,7	23,2	9
—	80	—	1,006 0	23,5	0,001 5	29,1	20,7	6
4	—	—	1,005 1	23,8	0,001 5	25,4	18,0	3,9
24	—	—	1,003 1	22,8	0,001 1	17,6	12,5	1,5

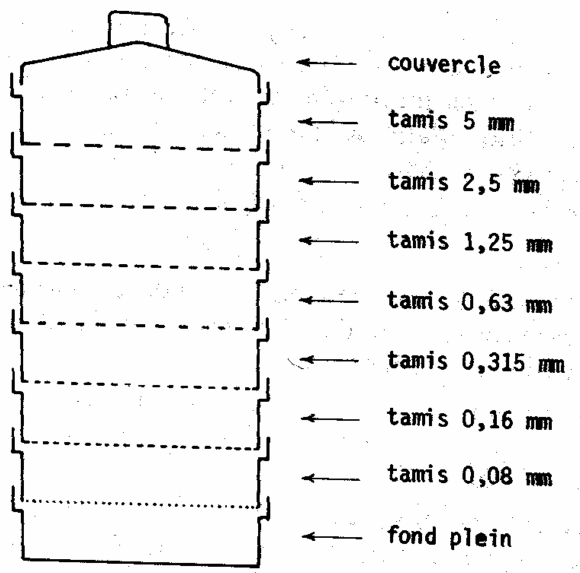
II. 8. Travaux Pratique n° 8 : <u>ANALYSE GRANULOMETRIQUE</u>

8. 1. Objectif visé : pour nombreux travaux de construction il est nécessaire de connaître certains caractéristiques des matériaux utilisés, à ce qui concerne les dimensions et la forme des grains,etc. L'analyse granulométrique est la première de ces recherches et elle caractérise les granulats en déterminant la grosseur des grains qui le constituent et les pourcentages des grains de chaque grosseur.

8. 2. Durée du TP : 4 heures ;

8. 3. Matériel nécessaire :

- Ce sont des **tamis**, dans lesquels l'organe de séparation est constitué d'une toile métallique perforée définissant des trous carrés.
- La dimension nominale d'un tamis est donnée de la longueur du côté du carré formé par les trous.
- Les valeurs de ces dimensions sont les termes d'une progression géométrique dont la raison est $\sqrt[10]{10}$, soit environ 1,259.
- La plus petite valeur est de 80 µm, parce que au dessous de cette dimension on trouve les fillers, farines ou fines ; et la plus grande valeur est de 80 mm.

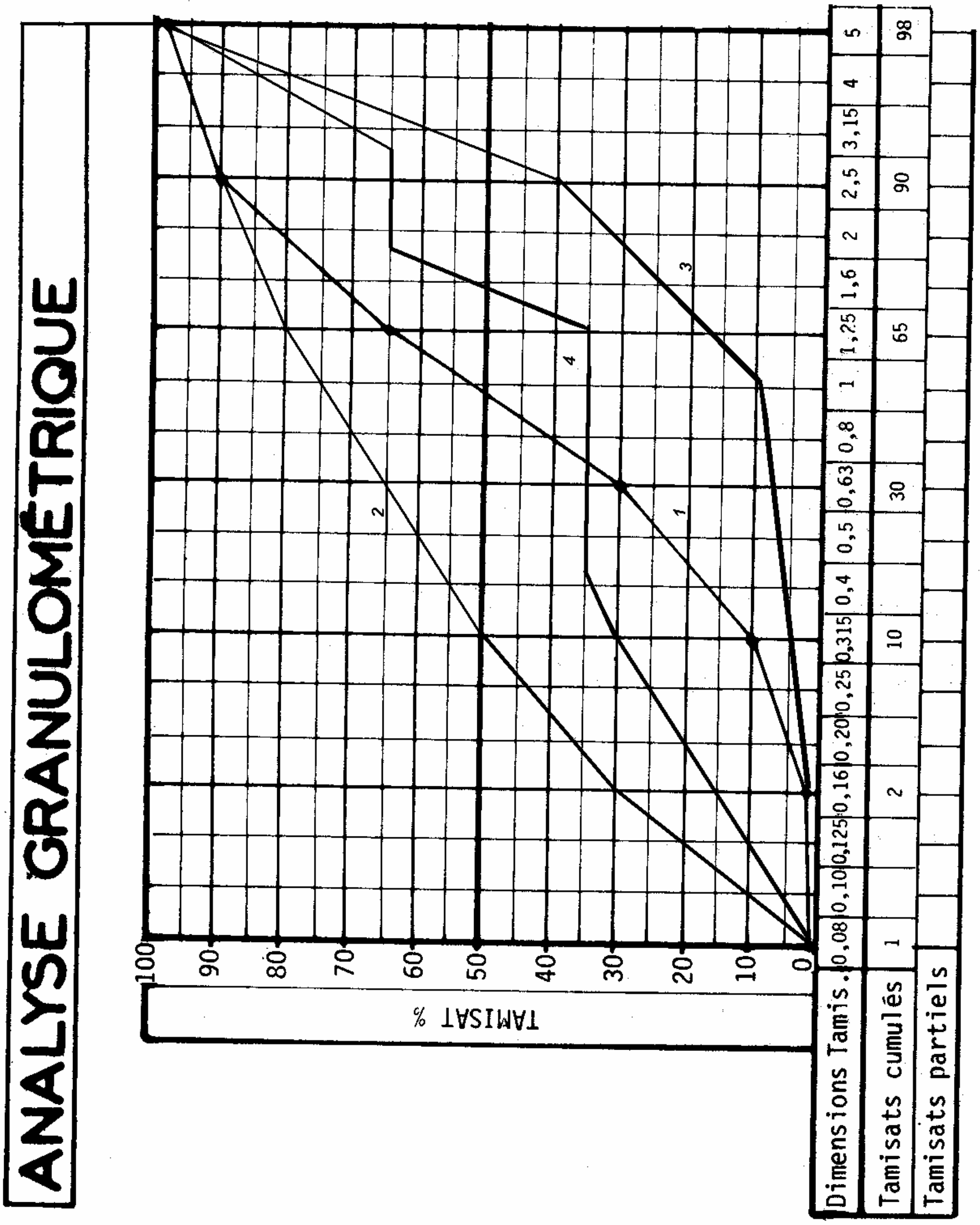


8. 4. Description du TP

- Cet essai est effectué pour les mélanges des granulats qui s'utilisent pour la préparation du béton.
- Une quantité de ce mélange est passé par un set des tamis en déterminant les poids de granulats qui restent sur chaque tamis.
- Avec ces résultats on trace la courbe granulométrique de ce mélange.
- Par rapport à l'allure de cette courbe on peut estimé si dans ce mélange de granulats ils sont dimensions qui manquent ou leur quantité est trop ou faible.
- Cette analyse permet d'adopter des mesures pour redresser la qualité d'un béton, en ce qui concerne :
    - le dosage des sables et des gravillons ;
    - le dosage du ciment ;
    - les résistances mécaniques estimés ;

8. 5. Déroulement du TP

- La quantité nécessaire pour une analyse est fonction du type de matériau comme ensuite :
    - 2,0 kg pour un sable ;
    - 5,0 kg pour un petit gravier ;
    - 10,0 kg pour un gros gravier ;
    - 20,0 kg pour des cailloux ;
- Le séchage est nécessaire, mais il devra être assez progressif, et à la température de 103°C, à la un four au thermostat.
- Le processus d'analyse granulométrique consiste en les étapes suivantes :
    1. Emboîter les tamis utilisés uns sur les autres avec les dimensions croissant de bas en haut comme sur le schéma ci-dessous.
    2. Verser le granulat sur le tamis supérieur, mettre le couvercle et imprimer à l'ensemble une série de secousses. On commencera ainsi de répartir ce granulat sur les différents tamis.
    3. Prendre le tamis supérieure seul, avec son contenu au-dessus d'un plateau propre et agiter ce tamis horizontalement, en le tenant d'une main et en le frappant contre l'autre environ de 120 coups. A chaque 40 coups on doit imprimer au tamis une rotation d'un quart de tour et on poursuivre l'agitation dans la nouvelle direction.
    4. Le refus sera pesé avec un balance d'une précision de 0,1% et le tamisât sera versé sur le tamis suivant ensemble avec s'y trouve déjà.
    5. De même jusqu'au dernier tamis. Le dernier tamisât quand il est ajouté sur la balance aux refus précédents, on doit retrouver le poids pesé au départ.
    6. On doit calculer après le poids pesé sur chaque tamis en pourcentage, si on considère la quantité initiale de granulat comme 100%.
    7. On trace la courbe granulométrique en prenant en abscisses les dimensions des tamis et en ordonnées les pourcentages déterminés ci-dessus.



La forme de la courbe renseigne immédiatement sur la granularité d'un mélange comme ci-dessus :

- courbe (1), en forme de doucine, est pour un granulat courant ;
- courbe (2), convexe vers la haut, est pour un granulat riche en sables ;
- courbe (3), concave vers la haut, est pour un granulat riche en gravillons ;
- courbe (4), présentant un palier, représente qu'il manque des éléments ;

II. 9. Travaux Pratique n° 9 : <u>EQUIVALENT DE SABLE</u>

9. 1. Objectif visé : Tous les granulats contiennent plus ou moins d'impuretés. Caractère commun à toutes ces impuretés est leur effet néfaste sur les qualités essentielles du béton – résistance, imperméabilité, durabilité, etc. Il est donc indispensable que les granulats n'en contiennent que dans le mesure où ces qualités ne sont pas affectées au-delà de limites tolérables.

9. 2. Durée du TP : 2 heures ;

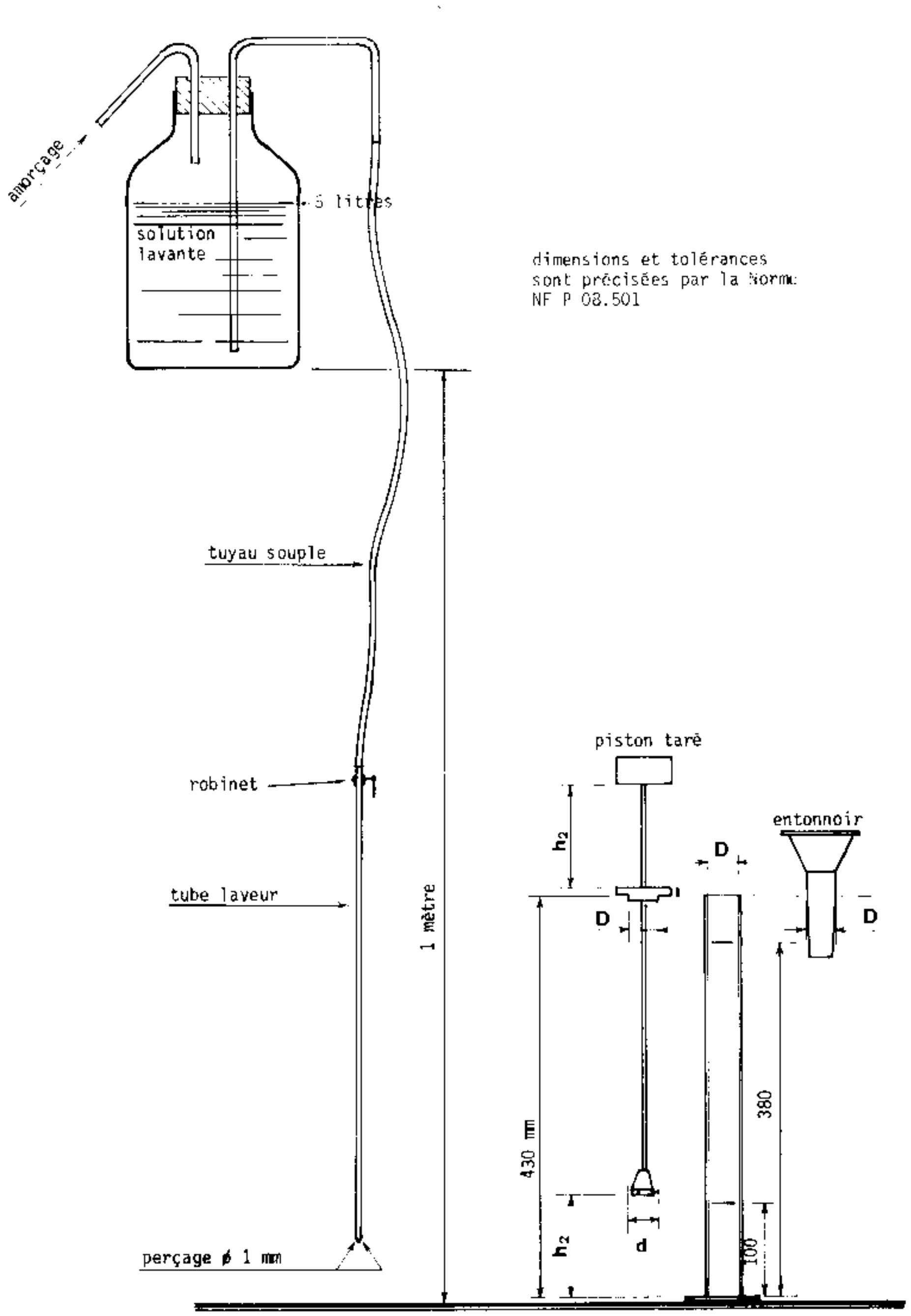
9. 3. Matériel nécessaire :

Cet essai est effectué en concordance avec la Norme NF 08. 501 et il a besoin des matériels suivants :

- Eprouvettes en matière plastique, avec deux traits repères ;
- Entonnoir ;
- Bonbonne de 51 ;
- Bouchon pour cette bonbonne, avec siphon et tube souple de 1,50 m ;
- Tube laveur, prolongeant le tube souple ; métallique
- Machine agitatrice, électrique ou manuelle ;
- Réglet de mesure ;
- Piston taré, dont la masse mobile est de 1000 g ; son diamètre (d) est légèrement inférieur à celui (D) des éprouvettes, et comporte 3 petites vis formant butées ;
- Tamis, spatule, balance ;
- Chronomètre, thermomètre ;

9. 4. Matériaux nécessaires :

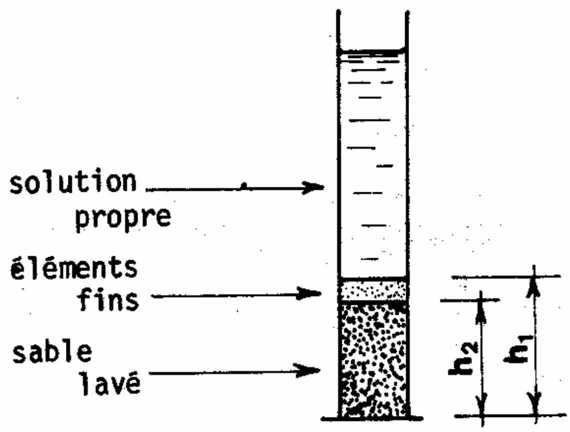
- 120 g de sable sec ou 130 g de sable humide ;
- 0,25 l de solution de lavage en recette suivante : (pour un litre de solution concentrée)
    - 111 g ± 1 g de chlorure de calcium ;
    - 480 g ± 5 g de glycérine ;
    - 12 à 13 g de solution aqueuse de formaldéhyde ;
    - le reste est l'eau propre pour dilution ;
- on prend 125 cm^3 de solution dans un récipient de 5 l et on ajoute avec l'eau jusqu'à remplissage du récipient – et dans ce cas on peut conserver la solution de lavage pour 48 heures ;
- si on utilise pour le remplissage de l'eau distillée, on peut conserver cette solution de lavage de 2 à 4 semaines ;


amorçage
5 litres
solution
lavante
dimensions et tolérances
sont précisées par la Norme
NF P 08.501
tuyau souple
robinet
tube laveur
1 mètre
perçage ø 1 mm
piston taré
entonnoir
D
d
380
430 mm
100

9. 5. Description du TP :

- Certaines impuretés perturbent les résultats au-delà des limites admissibles , même si elles ne sont qu'à l'état de traces : elles sont prohibées ; dans ce catégorie on peut trouver :
  - particules de charbon, de bois, ou de leurs résidus (coke, cendres, etc.)
- D'autres ont un effet moins puissant : elles peuvent être tolérées, dans des limites qui seront à définir ; et on peut trouver :
  - éléments très fines et/ou solubles ;
  - matières organiques ;
  - sulfates et sulfures, etc.
- **L'essai d'équivalent du sable** permet de déceler la présence d'éléments fins dans un sable et d'en caractériser leur importance par une valeur numérique.
- Cet essai est simple et rapide, le matériel nécessaire peu fragile, donc aisément réalisable à la carrière ou au chantier.
- Il faut plus de l'eau pour mouiller des éléments fins que pour des gros éléments, or on sait que le rapport C/E influence beaucoup les qualités d'un béton, donc un sable contenant beaucoup d'éléments fins conduira à une faible valeur de C/E et à la fois à une faible valeur résistance.
- Cet essai est nécessaire d'être effectué avant de commander un sable et aussi en cours de travaux, pour contrôler la qualité de sable livré.
- L'essai est fait sur un sable qui traverse le tamis de 5 mm ; on doit laver l'échantillon et laisser reposer et après ça on doit mesurer :
  - la hauteur (h_1) qui représente le sable propre avec éléments fins ;
  - la hauteur (h_2) qui représente le sable propre seulement ;
- Par définition, l'équivalent de sable est :

$$ES = \frac{h_2}{h_1} \times 100 .$$



9. 6. Déroulement du TP :

1. On doit remplir les éprouvettes jusqu'au premier trait ;
2. Verser la quantité de sable voulue ;
3. Eliminer les bulles d'air et laisser reposer 10 min.
4. Boucher les éprouvettes et les agir avec des mouvements rectiligne pendant de 30 s ;
5. Laver et remplir les éprouvettes avec le tube laveur :
   - rincer le bouchon, au-dessus de l'éprouvette ;
   - faire descendre le tube laveur en le faisant tourner entre les doigts ;
   - laver le sable en descendre et remonter lentement le tube laveur, que l'on tourne entre les doigts, dans la masse de sable ; on fait ainsi remonter les particules fines ;
   - sortir le tube laveur et fermer le robinet lorsque le niveau du liquide atteint le trait supérieur ;
6. Laisser reposer 20 min. en éviter toute vibration ;
7. Mesurer à vue (h_1) et (h_2) plus précise possible ;
8. Descendre lentement le piston taré dans le liquide à travers le floculat, le manchon prenant appui sur le bord supérieur de l'éprouvette et l'immobiliser au contact du sable ; mesurer encore à fois (h_2) ;
9. Noter la température ;

Expression des résultats :

Reporter les résultats sur un Procès - Verbal d'essai et on calcule pour chaque éprouvette ESV et ES avec un précision de chiffre décimal. On retiendra les moyennes arithmétiques, arrondies chacune à l'entier de plus proche.

Précautions :

- Matériel très propre ;
- Solution lavante de fabrication récente ;
- Attention aux petits orifices du tube laveur ;
- Eviter toutes vibrations pour les éprouvettes en cours d'essai ;

Des valeurs courantes sont :

- ES > 80 – on a des bons granulats ;
- 80 < ES < 70 – à n'utiliser qu'exceptionnellement et à condition d'employer un ciment Portland ;
- ES < 70 – il faut laver le granulat, pour éliminer les éléments fins ;
- La présence d'éléments fins dans un granulat améliore la maniabilité du béton et un équivalent de sable très élevé correspond donc à un sable donnant un béton « raide ».

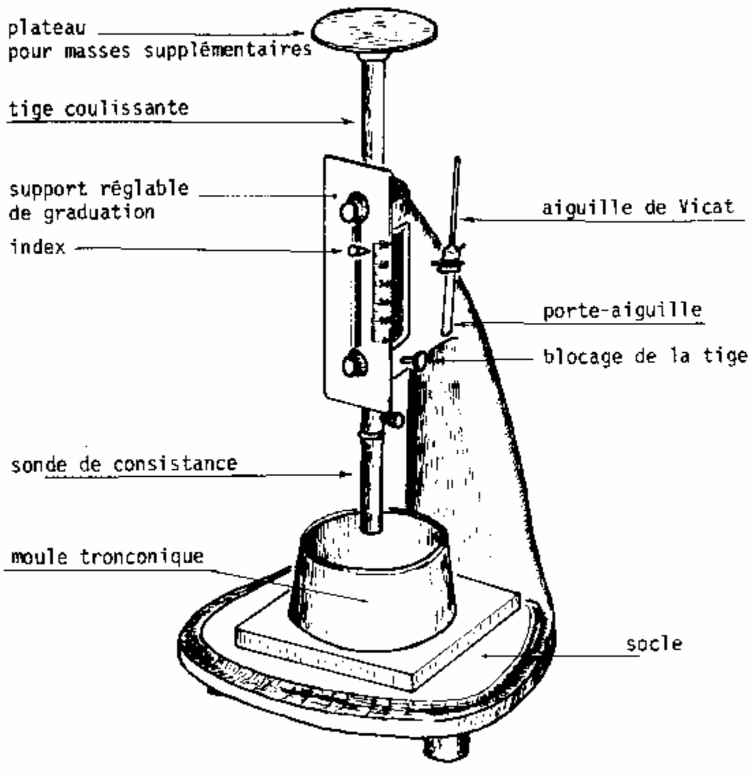
II. 10. Travaux Pratique n° 10 : ESSAI DE PRISE POUR LE CIMENT

10. 1. Objectif visé : La prise du ciment est une réaction chimique qui, à partir d'un corps anhydre et instable auquel on ajoute de l'eau, donne un nouveau corps, stable et indéformable. Il est indispensable que la mise en œuvre soit terminée lorsque la prise commence et alors il est nécessaire de connaître le temps qui s'écoule entre le gâchage et le début de prise.

10. 2. Durée du TP : 4 heures ;

10. 3. Matériel nécessaire :

- l'appareil de Vicat :



10. 4. Matériau utilisé :

- On utilise un mortier de type « normal », donc la recette est :
  - ciment – 1 partie, en poids (par exemple 450 g) ;
  - sable normal – 3 parties en poids (par exemple 1350 g) ;
  - l'eau – ½ partie en poids (par exemple 225 g) ;
- Parce que on doit caractériser le ciment utilisé, il faut que la seule variable soit la nature du ciment.

10. 5. Déroulement de l'essai :

1. Peser les quantités suivantes des matériaux :
   - ciment : 450 g ;
   - sable normal : 1350 g ;
   - l'eau : 225 g ;
2. Fabriquer le mortier normal correspondant ;
3. Remplir le moule tronconique de ce mortier et araser ;
4. En attendent que la prise soit sur le point de commencer, placer l'éprouvette ainsi constituée dans de l'eau à 20°C, on ne l'en sortira que pendant les courts instants nécessaires aux essais . Quand le moment suppose au début de prise approche, porter l'éprouvette sur le plateau de l'appareil Vicat.
5. Immobiliser l'aguille au contact de mortier ;
6. En la lâcher sans vitesse initiale. Si l'arrêt se produit à une distance comprise entre 0 et 2 mm, il y a sans doute interposition d'un grain de sable et la prise n'est pas commencée.
   Si l'arrêt se produit à 2,5 mm ou plus, du fond, la prise est commencée ;
7. Bien entendu, il faut que le premier de ces essais conduise à constater que la prise n'est pas commencée. On reportera aussitôt l'éprouvette dans l'eau et on recommencera les essais toute en 10 min, jusqu'au début de prise.

<u>Ordre de grandeur de temps de prise</u> :

- ciments à prise rapide : 5 à 8 minutes ;
- ciments à prise ½ lente : 8 à 30 min ;
- ciments à prise lente : 30 min. à 6 heures ;
- ciments à prise très lente : plus de 6 heures ;

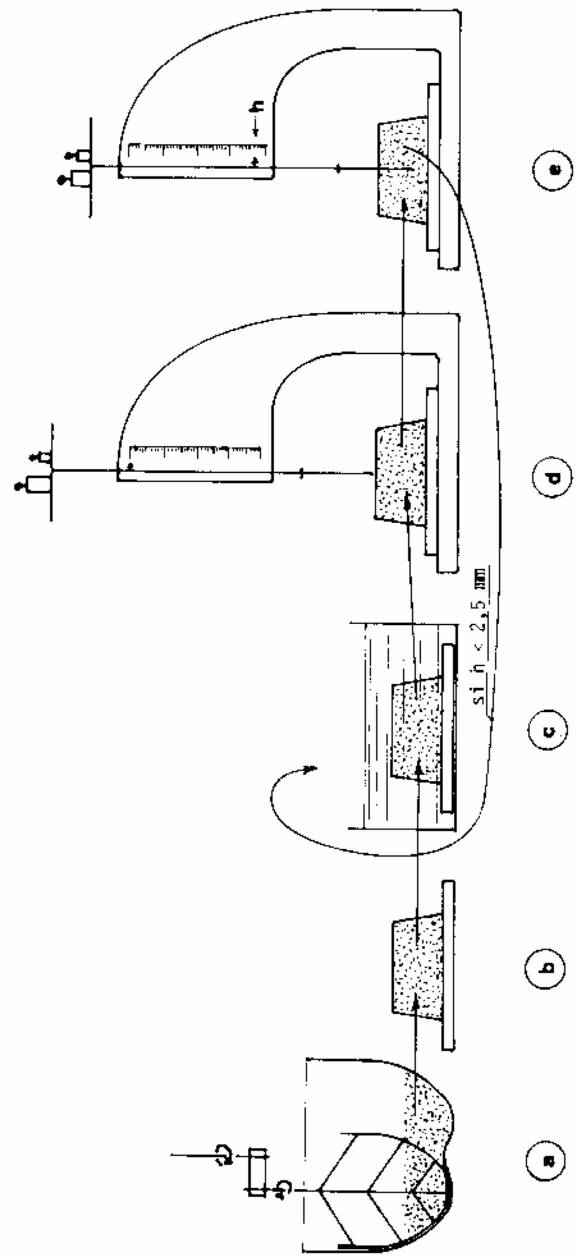
Les ciments les plus courantes (ciments Portlands) sont à prise lente et le temps de prise usuelle est de ordre à 3 heures.

<u>Accélérateurs et retardateurs de prise</u> :

Ils permettent de corriger en fonction des besoins le temps de prise des liants dont on dispose. On peut utiliser :

- Comme accélérateurs :
  - soude caustique ;
  - ammoniaque ;

- Comme retardateurs :
  - acides et sels divers ;
  - sulfates de : cuivre, fer, zinc ;
  - chlorure de calcium ;
  - sucre ; etc.
- On peut représenter le schéma de cet essai comme ci-dessous :



II. 11. Travaux Pratique n° 11 : ESSAI DU CONE D'ABRAMS

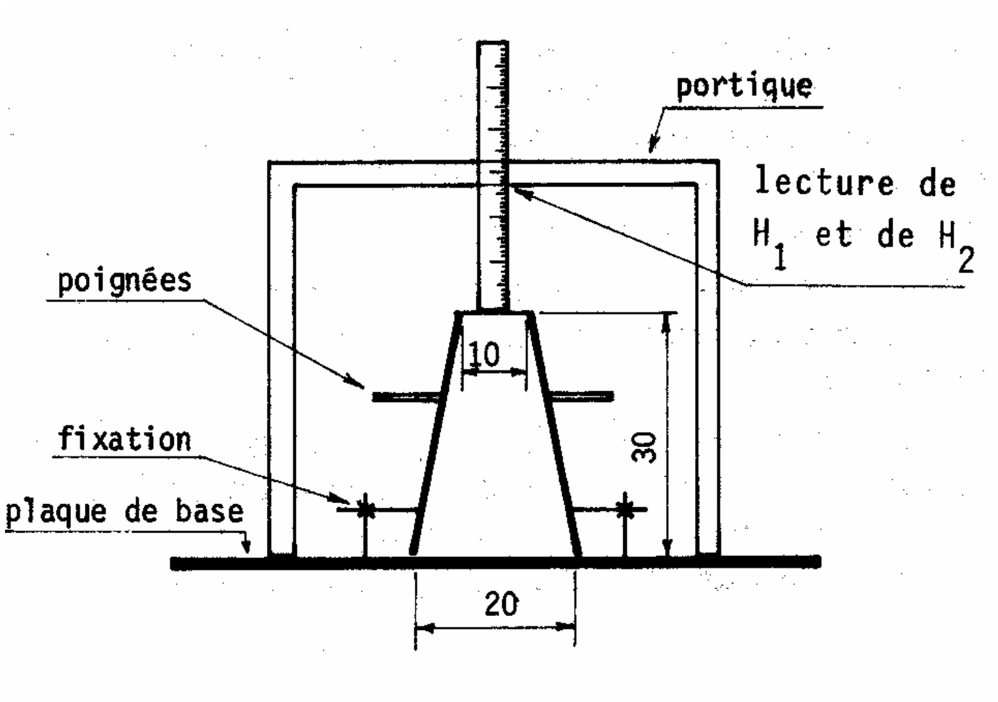
11. 1. Objectif visé : La maniabilité des bétons est caractérisée par une valeur numérique la plus ou moins grande difficulté rencontrée dans la mise en œuvre des bétons. Cette maniabilité dépend surtout :

- de la quantité de l'eau de gâchage ;
- de la provenance des granulats ;

11. 2. Durée du TP : 2 heures ;

11. 3. Matériel nécessaire :

C'est le « Cône d'Abrams » comme ci-dessous :



Accessoires :

- poignées de préhension, aux 2/3 de la hauteur ;
- plaque de base ;
- dispositif de fixation ;
- portique de mesure, avec règle graduée ;
- tige de piquage en acier Ø 16 mm , l = 60 cm ;
- entonnoir pour introduire le béton ;

11. 4. Description de l'essai

- Mouler le béton, dans de conditions déterminées ;
- Oter le moule : le béton s'affaisse ;
- Mesurer l'affaissement (ΔH) ;
- Pour avoir des corrects résultats, le matériau du cône doit remplir les conditions suivantes :
  - rigide ;
  - surface lisse ;
  - ne réagit pas avec les liants ;
  - en général on utilise tôle d'acier en épaisseur de 1,5 mm.

11. 5. Déroulement du TP :

1. Huiler légèrement le moule et humecter la plaque de base ; fixer le cône sur la plaque ;
2. Remplir le cône de béton en respectant les règles suivantes :
   - on doit couler 4 couches de hauteurs sensiblement égales ;
   - chaque couche on doit piquée de 25 coups de tige ;
   - le dernière couche doit être arasé avec la tige de piquage ;
3. Démouler en soulever le cône sans lenteur excessive et sans brutalité.
4. Laisser le mouvement d'affaissement se stabiliser (environ 1 minute) ; après mesurer la nouvelle hauteur entre béton et portique.
5. L'affaissement est dans ce cas :

$$\Delta H = H_2 - H_1 ;$$

Résultats **:**

- 0 à 3 cm – béton très ferme ;
- 3 à 6 cm – béton ferme ;
- 6 à 9 cm - béton normal ;
- 9 à 12 cm – béton mou ;
- plus de 13 cm – béton très mou ;
- au moins trois prélèvements consécutifs on doit faire, et on arrondira au centimètre le plus proche la moyenne des résultats ;

Affaissement spécifié :	Ecart toléré :
0 à 4 cm	± 1 cm ;
5 à 9 cm	± 2 cm ;
> 10 cm	± 3 cm ;

- L'avantage de cette méthode est qu'elle est simple, nécessite matériel réduit et peu onéreux ;
- Aussi elle est une méthode fidèle et commode ;

QUESTIONS	BAREME
1. Quelles sont les dimensions nominales de tamis ?	**2 /20**
2. Définir une classe granulaire ?	**2/20**
3. Montrer la différence entre un granulat élémentaire et un granulat composé ?	**2/20**
4. Par rapport à la forme de la courbe granulométrique, quelles renseignements peuvent obtenir ?	**2/20**
5. Définir le module de finesse d'un granulat ?	**2/20**
6. Définir le coefficient d'aplatissement d'un granulat ?	**2/20**
7. Nommez les trois type de l'eau qu'on peut trouver dans un bois ?	**2/20**
8. Décrivez la méthode de séparation par quartage pour échantillons.	**2/20**
9. Pour l'essai de la masse volumique apparente en place, quelles informations doivent être contenus par le procès-verbal ?	**2/20**
10. Pour l'essai de détermination de la limite de retrait, quelles informations on doit trouver dans le procès-verbal d'essai ?	**2/20**
Total :	**20/20**

REPONSES	BAREME
1. **Les dimensions nominales –** représentent la longueur du côté formé par les trous des tamis. Ces dimensions nominales (**d ou D, en mm)** sont normalisées comme ensuite : **0,080 0,100 0,125 0,160 0,200 0,250 0,315 0,400** **0,500 0,630 0,800 1,000 1,250 1,600 2,000 2,500** **3,150 4,000 5,000 6,300 8,000 10,00 12,50 16,00** **20,00 25,00 31,50 40,00 50,00 63,00 80,00**	**2/20**
2. Classes granulaire – un granulat est caractérisé du point de vue granulaire, par sa classe d/D ; cela signifiant que (d) désigne la plus petite dimension et (D) la plus grande dimension des grains (par exemple : 20/40 mm)	**2/20**
3. Granulat élémentaire **–** est un granulat entièrement retenu sur le tamis D(i) ; et passant entièrement à travers le tamis D(i+1) ; où D(i) et D(i+1) sont dimensions nominales consécutives ; Granulat composé – est un mélange de deux ou plusieurs granulats élémentaires différents, tous les granulats commerciaux entrent dans la classe des granulats composés ;	**2/20**
4. La forme de la courbe granulométrique renseigne immédiatement sur la granularité du granulat, comme en suite : - courbe en forme de doucine – granulat courant (bon) ; - courbe convexe vers la haut – granulat riche en éléments fins ; - courbe concave vers le bas – granulat pauvre en éléments fins ; - courbe présentant un palier – il manque les éléments moyens ;	**2/20**
5. **Définition :** le module de finesse d'un granulat est égal au 1/100 ème de la somme des refus, exprimés en pourcentages de poids sur les différents tamis de la série suivante : 0,08 ; 0,016 ; 0,315 ; 0,63 ; 1,25 ; 5,0 ; 10,0 ; 20,0 ; 40,0 ; 80,0 ;	**2/20**
6. **Définition :** le coefficient d'aplatissement, coefficient volumétrique moyen, c'est le rapport entre le volume absolu des grains du gravier considéré et le volume des sphères circonscrites correspondantes.	**2/20**

7. **L'eau dans le bois,** peut être dans les formes suivantes : **- Eau libre :** Remplit les cellules quand leurs membranes sont à saturation. **- Eau d'imprégnation :** Située dans les membranes cellulaires. **- Eau de constitution :** Avec la matière ligneuse, fait partie de la composition ;	**2/20**
8. - On doit placer l'échantillon bien homogénéisé dans un bac métallique à bords peu élevés et l'étaler sur une surface plane. - A l'aide d'une truelle on partage d'abord en deux moitiés (1) et après ça en 4 quarts (2) sensiblement égaux. - On doit éliminer les fractions A et D et réunir les fractions opposées B et C et on a ainsi la moitié de l'échantillon primitif. - Si cette quantité (1/2) est encore trop importante, on doit suivi les même processus, d'où un échantillon représentatif égal au ¼ de la quantité primitive, et ainsi de suite ;	**2/20**
9. Le procès-verbal d'essai doit contenir les informations suivantes : - la référence au présent document – NF P 94-061-2 ; - l'identification de l'affaire ou du chantier ; - le nom de l'organisme qui a effectué l'essai ; - la date de l'essai ; - la situation de l'essai ; - la masse volumique du matériau ; - la masse volumique du matériau sec ; - éventuellement la teneur en eau ;	**2/20**
10. Le procès-verbal d'essai de détermination de la limite de retrait doit faire apparaître les suivantes informations : - la référence au présent document, la norme : XP P 94-060- - la provenance du matériau : site, sondage, profondeur, date et mode de prélèvement ; - le nom de l'organisme qui a réalise l'essai, le numéro de dossier et la date d'essai ; - la valeur de la teneur en eau pondérale ($\mathbf{W_R}$) en pourcentage correspondant à la limite de retrait ;	**2/20**
Total :	**20/20**

Liste des références bibliographiques

Ouvrage	Auteur	Edition
Maurice Cassan	Les essai d'eau dans le reconnaissance des sols	1984
M. Yu. Abelev	Bases d'élaboration des projets sur les sols loessiques affaissables	1986
Francise Gorisse	Essais et contrôle des bétons	1978
Denis Tremblay	Bétons de ciment	1983
D. Didier	Précis de chantier	1994
René Vitone	Bâtir	1999
Emile Olivier	Sols et fondations	1971
Henri Cambefort	Reconnaissance des sols	1983
AFNOR	Recueil des normes françaises Tome : Fouilles et terrassements	1984
R. Lauchon	Cours de laboratoire : Granulats, bétons, sols	1983
R. Lauchon	Cours de laboratoire : Granulats, bétons, sols Edition 2	1989

NB : Outre les ouvrages, la liste peut comporter toutes autres ressources jugées utiles (Sites Internet, Catalogues constructeurs, Cassettes, CD, …)